

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Державне космічне агентство України
Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал»

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Поздняков Дмитро Вікторович

УДК 681.7

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗМЕНШЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ВАГИ ВХІДНОЇ ОПТИКИ
ЗОБРАЖУЮЧОГО ФУР'Є – СПЕКТРОМЕТРА
КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ**

05.11.07 – Оптичні прилади та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Колобродов В.Г.

доктор технічних наук, професор

Київ – 2018

АНОТАЦІЯ

Поздняков Д.В. Зменшення деформації та ваги вхідної оптики зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.07 – оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню наукової задачі забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

Системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) використовуються при вирішенні багатьох задач. Однією з перспективних систем ДЗЗ є зображуючі Фур'є - спектрометри (ЗФС), що можуть створювати так званий «куб даних», який по двом осям має дві просторові координати підстилаючої поверхні, а по третій осі - спектральну координату, причому реєстрація за цією координатою проводиться у сотнях спектральних каналів. Але при створенні таких систем виникає багато труднощів, однією з яких є співвідношення діаметра дзеркал та його ваги у дзеркальних чи дзеркально-лінзових системах вхідної оптики.

У першому розділі наведено класифікацію гіперспектральних систем за способом формування двовірного зображення та за способом спектральної селекції. Коротко розглянуті їх переваги та недоліки. Також розглянуто класифікацію зображуючих Фур'є-спектрометрів (ЗФС) в залежності від принципу їх роботи. Встановлено, що найбільшим компонентом системи, який присутній у всіх видах ЗФС, є вхідна оптика. Вона будує зображення підстилаючої поверхні на щілині або у площині проміжного зображення. Для отримання якісного зображення вхідна оптика повинна формувати

зображення підстилаючої поверхні з якістю, що близька до дифракційної межі.

Для збільшення просторового розділення та світлосили приладу в цілому збільшують діаметр головного дзеркала вхідної оптики. Це призводить до великого росту ваги оптики. Тому при розробці вхідної оптики треба використовувати полегшені дзеркала. Наведені класичні типи полегшення, які використовуються, та проаналізовані відомі дослідження з цього питання.

У другому розділі наведений запропонований метод проектування ЗФС статичного та комбінованого типів на базі інтерферометра Сан`яка на основі розділення його роботи на чотири етапи: формування зображення вхідною оптикою у площині вхідної щілини, формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання, формування сигналу приймачем випромінювання, обробка сигналу та відновлення спектральної характеристики. Така послідовність дозволяє визначити всі основні параметри та характеристики ЗФС, а також прискорити та спростити процес створення та оптимізації базової моделі ЗФС. Наведені математичні моделі для кожного з етапів роботи. Дослідження математичних моделей ЗФС показало, що вхідна оптика, при зміщенні, нахилах або деформаціям компонентів вносить набагато більше спотворень у створюване системою зображення. Тому питання зменшення ваги та деформації дзеркал вхідної оптики ЗФС є актуальним питанням.

Наведено розроблену математичну модель для визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією факторів зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів. Використання такої математичної моделі допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій. Розроблену

математичну модель було відлагоджено та перевірено в програмному середовищі MATLAB, після чого він був реалізований в прикладному програмному забезпеченні «Deform».

Також наведено розроблену методику проведення дослідження впливу зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень) на деформацію робочих поверхонь оптичних елементів. Розроблена методика дозволяє проводити практично повний цикл моделювання оптичних елементів. Її можливо використовувати для визначення деформацій будь-яких оптичних поверхонь та елементів під дією будь-яких зовнішніх впливів. Така методика дозволяє скоротити витрати на натурне моделювання всіх процесів, що діють на оптику та призводять до її деформації та на визначення самих деформацій.

У третьому розділі, використовуючи запропоновані математичну модель визначення деформації та методику проведення дослідження, було вперше отримано комплекс залежностей деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики від геометричних параметрів їх полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики. Отримані залежності показали можливості для зменшення ваги та деформації робочих поверхонь дзеркал.

Були розглянуті питання створення дзеркал з різних матеріалів: склокераміки, берилію та карбіду кремнію.

Також розглянуті варіанти кріплення осесиметричних та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал. Наведені залежності деформації їх робочих поверхонь від геометричних параметрів кріплення. Проаналізовано залежність деформації дзеркал від їх положення у кріпленні відносно напрямку дії сили тяжіння.

Використовуючи створені математичну модель та методику, можна розрахувати дзеркала з полегшенням до 60-80%, використання яких не вносить аберацій у оптичну систему, а отже не зменшує модуляційну передавальну функцію (МПФ) системи.

У четвертому розділі наведено результати дослідження впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення на окремі коефіцієнти Церніке, на які розкладається деформація робочої поверхні, та їх вплив на модуляційну передавальну функцію МПФ системи. Для дослідження впливу деформацій робочих поверхонь дзеркал на МПФ обрано тридзеркальний об'єктив. Він побудований по принципу умовно-децентрованого об'єктиву з позаосьовим щілинним полем зору. За допомогою запропонованої математичної моделі визначення деформації робочих поверхонь та методики проведення дослідження полегшення дзеркал було розраховано таку конструкцію полегшення дзеркал тридзеркального об'єктива, яка не буде збільшувати деформацію робочої поверхні дзеркала під дією сили тяжіння (тобто не буде призводити до падіння МПФ), однак вагу при цьому вдається зменшити до 70%.

Приведено запропонований метод зменшення деформації, що базується на використанні спеціальної конструкції підтримки. Даний метод можна використовувати для зменшення деформації робочої поверхні дуже великих позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал (з великою стороною більше 0,5 м), у яких наявна значна деформація навіть при правильному розрахунку полегшення та положення кріплення.

Наведено експериментальну перевірку роботи математичної моделі для визначення деформацій робочих поверхонь оптичних елементів. Перевірка показала збіг експериментальних даних та даних, отриманих при комп'ютерному моделюванні та розрахунку запропонованою математичною моделлю.

Ключові слова: зображуючий Фур'є - спектрометр, полегшення дзеркал, коефіцієнти Церніке.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20, № 5 (90). – С. 35-40.
2. Поздняков Д.В. Математичне моделювання статичного зображуючого фур'є-спектрометра для дистанційного зондування землі / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – №6. – С. 79-84. DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.78026.
3. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №2. – С. 89-96. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144.
4. Pozdniakov D. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur // Eastern-Europe journal of enterprise technologies. – 2017. – №4, Information and controlling systems. – P.46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108458 (входить до наукометричної бази Scopus).
5. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №6. – С.93-100.
6. Поздняков Д.В. Закономірності впливу розмірів великогабаритних дзеркал для дистанційного зондування Землі на вибір типу їх полегшення / Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №.1 – С.65-72.

7. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 23-24 квітня 2014. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 64-65.
8. Pozdniakov D.V. Optical systems of fourier transform imaging spectrometer for remote sensing / D.V. Pozdniakov, V.G. Kolobrodov // Scientific works of 15th International young scientists conference «Optics and high technology material science», October 23-26, 2014. – Kyiv: Taras Shevchenko national university of Kyiv. – 2014. - P.173.
9. Поздняков Д.В. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування», 10-11 грудня 2014 р. – Київ: КП СПБ «Арсенал». - 2014. – С.53-55.
10. Поздняков Д.В. Математичне моделювання зображувального фур'є – спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 22-23 квітня 2015р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – С.71-72.
11. Поздняков Д.В. Математическое моделирование изображающего фурье – спектрометра ДЗЗ / Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», 22-24 апреля 2015. – Минск: БНТУ. – 2015.

12. Поздняков Д.В. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 35-36.
13. Поздняков Д.В. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів дистанційного зондування землі на деформацію їх оптичної поверхні / Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 16-ої Української конференції з космічних досліджень, 22-27 серпня 2016 р. – Одеса. – 2016 р. – С. 218.
14. Поздняков Д.В. Метод кріплення та юстування великогабаритних позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / А.М. Ворох, І.Л. Зозуля, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 6-7 грудня 2016 р. – Київ. – 2016. – С.186-188.
15. Поздняков Д.В. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Сборник тезисов докладов 6-ой Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г. – Днепр. – 2017г. – С.80.
16. Поздняков Д.В. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 36-37.
17. Поздняков Д.В. Метод контролю форми асферичних дзеркал / Б.Ю. Пінчук, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан

і перспективи», 16-17 травня 2017р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С.32-33.

18. Поздняков Д.В. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 208.
19. Поздняков Д.В. Система разгрузки крупногабаритных зеркал для систем дистанционного зондирования Земли / А.М. Ворох, Д.В. Поздняков, И.Л. Зозуля, И.Г. Игнатова // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 88.

SUMMARY

Pozdniakov D.V. Reducing the deformation and weight of the input optics of the space-based Fourier transform imaging spectrometer. – Manuscript copyright.

A thesis for a degree of the Doctor of Philosophy in the Faculty of Instrumentation Engineering by specialty 05.11.07 – optical devices and systems. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of ensuring the high quality of the form of working surfaces of the entrance optics of the FTIS with the reduction of the weight of its mirrors.

Earth remote sensing systems are used to solve many problems. One of the most promising remote sensing systems is the Fourier transform imaging spectrometer (FTIS) that can create the so-called "data cube", which has two spatial coordinates of the underlying surface on two axes, and the third axis - the spectral coordinate, with the registration of this coordinate conducted in hundreds of spectral channels. But when creating such systems, many difficulties arise, one of which is the ratio of the diameter of the mirrors and their weight in the mirror or mirror-lens systems of the input optics.

In the first chapter describes the classification of hyperspectral systems by the method of forming a two-dimensional image and by the method of spectral selection. Briefly reviewed their advantages and disadvantages. Also, the classification of FTIS is considered, depending on the principle of their operation. It has been established that the largest component of the system, which is present in all types of FTIS, is the input optics. It builds the image of the underlying surface on the gap or in the plane of the intermediate image. In order to obtain a qualitative image, the input optics must form an image of the underlying surface with a quality close to the diffraction limit.

In order to increase the spatial separation and illumination of the system in general, the diameter of the main mirror of the input optics is increased. This leads to a large increase in the weight of optics. Therefore, in the development of input optics, lightweight mirrors should be used. The classical types of weight reduction that are used are given and well-known research on this subject is analyzed.

In the second chapter presents a new method for designing static and combined types of FTIS with on Sagnac interferometer, based on the division of its work into four stages: the formation of the image of the input optics in the plane of the input slit, the formation of an interference pattern on the radiation-measuring instrument, the formation of a signal by the radiation-measuring instrument, signal processing and the restoration of the spectral characteristics. This new method allows to define all the main parameters and characteristics of the FTIS, as well as speed up and simplify the process of creating and optimizing the FTIS basic model. For each stage, a mathematical model is developed. The research of such mathematical model of the FTIS showed that the input optics, in the case of bias, tilt or deformation of components, introduces much more distortion in the image created by the system. Therefore, the issue of weight reduction of the mirrors of the input optics of FTIS is an actual question.

A mathematical model was developed for determining the deformation of the working surface of the mirrors of the entrance optics of the FTIS under the influence of external factors (temperature, gravity, other forces and loads), which differs from the known ability to determine the deformation of both round surfaces and other forms of any shape and faster processing results when optimizing a large number of parameters. The use of such mathematical model helps to reduce the time and cost necessary for the design of the input optics with a minimum of deformations. The developed mathematical model was debugged and tested in the MATLAB software environment, after it was implemented in the application software "Deform".

The methodology of carrying out the research of the influence of the external factors (temperature, gravity, other forces and loads) on the deformation of the

working surfaces of optical elements has been developed. The developed methodology allows to carry out practically complete cycle of modeling of optical elements. It can be used to determine the deformations of any optical surfaces and elements under the influence of any external factors. This methodology allows to reduce the cost of the full-scale modeling of all the processes that affect the optics and lead to its deformation and to determine the deformation itself.

In the third chapter, using the proposed mathematical model for determining deformations and the methodology of carrying out the research, for the first time a complex study of the influence of geometrical parameters of weight reduction and mounting, their types, sizes and types of mirrors of the input optics on the deformation of their working surface was carried out. The study showed the possibilities of decreasing of weight of the mirrors and deformation of their working surfaces.

The issues of creating mirrors from different materials: glass ceramics, beryllium and silicon carbide were considered.

Also, variants of mounting of axisymmetric and non-axial segments of axisymmetric mirrors are considered. Dependence of the deformation of their working surfaces on the geometric mounting parameters is given. The dependence of the deformation of mirrors on their position in mounting relative to the direction of gravity action is analyzed.

Using created mathematical model and methodology, it is possible to calculate mirrors with a weight reduction of up to 60-80%, the use of which does not introduce aberrations into the optical system, and therefore does not reduce the modulation transfer function (MTF) of the system.

In the fourth chapter, the results of the study of the influence of geometrical parameters of weight reduction and mounting on the individual coefficients of Zernike, on which the deformation of the working surface is decomposed, and their influence on the modulation transfer function of the FTIS are given. To investigate the influence of deformation of the working surfaces of mirrors on the MTF, a three-mirror lens, is chosen. It is built on the principle of a conditionally

decentralized lens with an off-axial slit field of view. With the proposed mathematical model for determining deformations of the working surfaces and the methodology of carrying out the research of mirror weight reduction it was suggested a design of weight reduction of mirror in a three-mirror lens that would not increase the deformation of the working surface of the mirror under the action of gravity (it would not lead to a drop in the MTF), but the weight can be reduced to 70%.

The proposed method of reduction a deformation based on the use of a special support design is given. This method can be used to reduce the deformation of the working surface of very large off-axial segments of axisymmetric mirrors (with a large side of more than 0.5 m), in which there is a significant deformation, even with the correct calculation of weight reduction and mounting position.

The experimental verification of the mathematical model for determining the deformations of the working surfaces of optical elements is presented. The test showed the coincidence of experimental data and data obtained by computer modeling and calculation by the proposed mathematical model.

Key words: Fourier transform imaging spectrometer, weight reduction, coefficients of Zernike.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20, № 5 (90). – С. 35-40.
2. Поздняков Д.В. Математичне моделювання статичного зображуючого фур'є-спектрометра для дистанційного зондування землі / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – №6. – С. 79-84. DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.78026.
3. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №2. – С. 89-96. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144.
4. Pozdniakov D. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur // Eastern-Europe journal of enterprise technologies. – 2017. – №4, Information and controlling systems. – P.46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108458 (входить до наукометричної бази Scopus).
5. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №6. – С.93-100.
6. Поздняков Д.В. Закономірності впливу розмірів великогабаритних дзеркал для дистанційного зондування Землі на вибір типу їх полегшення / Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №.1 – С.65-72.

7. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 23-24 квітня 2014. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 64-65.
8. Pozdniakov D.V. Optical systems of fourier transform imaging spectrometer for remote sensing / D.V. Pozdniakov, V.G. Kolobrodov // Scientific works of 15th International young scientists conference «Optics and high technology material science», October 23-26, 2014. – Kyiv: Taras Shevchenko national university of Kyiv. – 2014. - P.173.
9. Поздняков Д.В. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування», 10-11 грудня 2014 р. – Київ: КП СПБ «Арсенал». - 2014. – С.53-55.
10. Поздняков Д.В. Математичне моделювання зображувального фур'є – спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 22-23 квітня 2015р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – С.71-72.
11. Поздняков Д.В. Математическое моделирование изображающего фурье – спектрометра ДЗЗ / Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», 22-24 апреля 2015. – Минск: БНТУ. – 2015.

12. Поздняков Д.В. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 35-36.
13. Поздняков Д.В. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів дистанційного зондування землі на деформацію їх оптичної поверхні / Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 16-ої Української конференції з космічних досліджень, 22-27 серпня 2016 р. – Одеса. – 2016 р. – С. 218.
14. Поздняков Д.В. Метод кріплення та юстування великогабаритних позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / А.М. Ворох, І.Л. Зозуля, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 6-7 грудня 2016 р. – Київ. – 2016. – С.186-188.
15. Поздняков Д.В. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Сборник тезисов докладов 6-ой Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г. – Днепр. – 2017г. – С.80.
16. Поздняков Д.В. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 36-37.
17. Поздняков Д.В. Метод контролю форми асферичних дзеркал / Б.Ю. Пінчук, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан

і перспективи», 16-17 травня 2017р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С.32-33.

18. Поздняков Д.В. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 208.
19. Поздняков Д.В. Система разгрузки крупногабаритных зеркал для систем дистанционного зондирования Земли / А.М. Ворох, Д.В. Поздняков, И.Л. Зозуля, И.Г. Игнатова // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 88.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1: Огляд зображуючих Фур'є-спектрометрів та можливостей полегшення компонентів вхідної оптики	29
1.1. Порівняння мультиспектральних та гіперспектральних приладів	29
1.2. Застосування та класифікація гіперспектральних приладів	30
1.2.1. За способом формування двовимірного зображення	31
1.2.2. За способом спектральної селекції	33
1.3. Типи зображуючих Фур'є – спектрометрів	37
1.3.1. Статичні зображуючі Фур'є-спектрометри	38
1.3.2. Динамічні зображуючі Фур'є-спектрометри	42
1.3.3. Поляризаційні зображуючі Фур'є-спектрометри	44
1.3.4. Комбіновані зображуючі Фур'є-спектрометри	46
1.3.5. Порівняння типів зображуючих Фур'є-спектрометрів	46
1.4. Оптичні системи вхідної оптики зображуючих Фур'є-спектрометрів ..	48
1.5. Полегшення дзеркал вхідної оптики	50
1.5.1. Класичні варіанти полегшення дзеркал	51
1.5.2. Відомі дослідження полегшення дзеркал	54
1.6. Типи аналізу, що використовуються при моделюванні впливу зовнішніх факторів на дзеркала вхідної оптики	58
1.7. Висновки до розділу 1	60
РОЗДІЛ 2: Математична модель роботи зображуючих Фур'є-спектрометрів та визначення деформацій дзеркал його вхідної оптики	63
2.1. Математична модель роботи зображуючого Фур'є-спектрометра: вихідні положення	63
2.2. Формування зображення у площині вхідної щілини	63

2.3. Формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання	67
2.4. Формування сигналу приймачем випромінювання.....	72
2.5. Обробка сигналу та відновлення спектральної характеристики.....	72
2.6. Вплив на якість зображення деформації робочих поверхонь компонентів оптичної схеми зображуючого Фур'є-спектрометра.....	73
2.7. Опис деформації дзеркальних поверхонь поліномами Церніке	75
2.8. Методика проведення дослідження впливу умов зовнішнього середовища на вхідну оптику зображуючого Фур'є-спектрометра	79
2.9. Висновки до розділу 2	83

РОЗДІЛ 3: Дослідження деформації робочої поверхні дзеркал від геометричних параметрів полегшення та кріплення.....	85
3.1. Вихідні положення.....	85
3.2. Алгоритм проведення дослідження впливу параметрів полегшення на деформацію робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики	87
3.3. Матеріал дзеркал вхідної оптики	89
3.4. Кріплення дзеркал вхідної оптики	91
3.4.1. Кріплення за лиски або фаски	91
3.4.2. Кріплення за задню стінку	98
3.5. Полегшення дзеркал вхідної оптики.....	101
3.5.1. Осесиметричні дзеркала	101
3.5.2. Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал	108
3.6. Вплив розмірів та форми дзеркал вхідної оптики на вибір конструкції їх полегшення	110
3.7. Пошук оптимальних параметрів полегшення дзеркал вхідної оптики	118
3.8. Висновки до розділу 3	121

РОЗДІЛ 4: Дослідження впливу деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики зображуючого Фур'є-спектрометра на якість зображення...	122
4.1. Вихідні положення.....	122
4.2. Вплив деформації робочої поверхні дзеркал на аберації у оптичній системі	122
4.3. Вплив деформації робочої поверхні дзеркал на модуляційно- передавальну функцію конкретної системи	130
4.4. Метод зменшення деформацій для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.....	135
4.5. Експериментальна перевірка роботи розробленого алгоритму розрахунку деформацій	136
4.6. Розрахунокполегшення дзеркал для конкретної системи.....	138
4.7. Висновки до розділу 4	140
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	144
 ДОДАТКИ.....	 157
Додаток А.....	158
Додаток Б	165
Додаток В	167
Додаток Г	174
Додаток Д.....	179
Додаток Е	183

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДЗЗ	–	Дистанційне зондування Землі
ЗФС	–	Зображуючий Фур'є – спектрометр
ЗС	–	Задня стінка
МПФ	–	Модуляційна передавальна функція

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасної держави не можна уявити без використання космічного простору для вирішення як загальнодержавних, так і комерційних задач. Аналіз напрямків розвитку провідних держав засвідчує, що впровадження сучасних космічних технологій дозволяє вирішувати комплекс задач: зв'язку, навігації, картографування, моніторингу Землі та інше. Особливого значення набуває використання космічної техніки для створення космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Знімками, що отримують з космічних апаратів ДЗЗ, користуються спеціалісти у багатьох галузях, таких як: пошук корисних копалин, оцінювання ґрунтів для сільського господарства, вивчення та оцінювання океанічних ресурсів, виявлення забруднень, аналіз та прогнозування кліматичних змін, картографування рельєфу та інше.

Однією з перспективних систем ДЗЗ є зображуючі Фур'є - спектрометри (ЗФС), що можуть створювати так званий «куб даних», який по двом осям має дві просторові координати підстилаючої поверхні, а по третій осі - спектральну координату, причому реєстрація за цією координатою проводиться у сотнях спектральних каналів. Такі системи не тільки дають набагато більше інформації, ніж мультиспектральні системи, але ще й мають переваги над класичними (дисперсійними або фільтровими) гіперспектральними системами.

Але при створенні систем ДЗЗ, а конкретніше, при створенні оптичних систем ЗФС космічного базування, виникає багато проблем. Однією з таких проблем, при використанні дзеркальної чи дзеркально-лінзової входної оптики, є співвідношення діаметра дзеркал та ваги. Розробники оптичних систем прагнуть збільшити діаметр дзеркал, що в свою чергу збільшує не тільки апертуру приладу та просторове розділення, але й вагу оптики та вартість виводу всього приладу в цілому на орбіту. Тому питання полегшення дзеркал входної оптики ЗФС космічного базування при

зберіганні високої якості форми робочих поверхонь є актуальною задачею при розробці цих систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та в Казенному підприємстві спеціального приладобудування «Арсенал» і пов'язана з наступними науково-технічними проектами та роботами, виконаними за участю автора:

- дослідно-конструкторська робота «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності» згідно з наказом №479 від 17.03.2017;
- дослідно-конструкторська робота «Забезпечення системного отримання даних від космічної системи «Січ». Розроблення та виготовлення льотних зразків оптичного сканера з просторовим розділенням 2,5м (СВРЗ)» у частині розробки полегшених дзеркал згідно з договором №1-24/16 від 06.12.2016р.;
- роботи по виконанню виготовлення та поставки льотного зразка ОМБ МСУ для КА Січ-2-1, в частині терморозрахунку, згідно з договором з ДП «КБ «Південне» №01780 від 29.04.2015;
- розробка комплексу багатоспектрального моніторингу навколишнього середовища для запобігання аваріям, надзвичайним ситуаціям і ліквідації їх наслідків, тема № 2546 п, державний реєстраційний номер 0112U001489;
- тепловізійні системи спостереження безпілотних авіаційних та космічних апаратів, тема № 2903п, номер державної реєстрації 0116U003689.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи: забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність зменшення ваги вхідної оптики на основі порівняльного аналізу оптичних схем сучасних ЗФС космічного базування;
2. Дослідити математичну модель роботи ЗФС;
3. Розробити математичну модель визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
4. Розробити методику та провести комплексне дослідження впливу зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
5. Встановити комплекс залежностей впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики на деформацію їх робочої поверхні;
6. Провести експериментальну перевірку розробленої математичної моделі для визначення деформації робочих поверхонь дзеркал.

Об'єкт дослідження – вхідна оптика зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування.

Предмет дослідження – масогабаритні характеристики вхідної оптики зображуючого Фур'є - спектрометра космічного базування та шляхи їх зменшення.

Методи дослідження. З метою розв'язання поставлених задач в роботі використовується теорія аберацій оптичних систем та теорія інтерференції, математичне та комп'ютерне моделювання роботи ЗФС; комп'ютерне моделювання деформацій робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики ЗФС під впливом умов зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень); експериментальні дослідження розробленої математичної моделі визначення деформацій робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики ЗФС.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи: формування зображення вхідною оптикою, формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання, формування сигналу приймачем випромінювання та обробка сигналу;
2. Вперше розроблено математичну модель для визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів;
3. Вперше отримано комплекс залежностей деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики від геометричних параметрів їх полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики, які дозволили забезпечити незмінну модуляційно-передавальну функцію системи при зменшенні ваги дзеркал.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропонований новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи дозволяє скоротити та спростити створення та оптимізацію ЗФС;
2. Математична модель для визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень) та розроблене на його основі програмне забезпечення дозволяють:
 - врахувати багато чинників, що знижують якість створюваного оптичною системою зображення, ще на етапі моделювання, що зменшує кількість необхідних натурних випробувань, а отже знижує вартість та час розробки оптичних систем;

- імпортувати результати механічного та теплового аналізу оптичних систем у програми оптичного аналізу для аналізу їх оптичних характеристик при впливі на них зовнішніх факторів;
- 3. Методика проведення комплексного дослідження впливу зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС дозволила встановити комплекс залежностей, які показали можливості для зменшення ваги та деформації робочих поверхонь дзеркал, що дозволило зменшити вагу на 60 – 80%;
- 4. Запропонований метод зменшення деформацій позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал на основі системи підтримок дозволяє зменшити деформацію дзеркал у 2 – 3 рази у порівнянні з системою без підтримок.

Запропонована математична модель визначення деформації робочих поверхонь оптичних компонентів (дзеркал) при впливі на них зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також програмне забезпечення, що створене на його основі, використані у КП СПБ "Арсенал" (м. Київ) при проектуванні та створенні полегшених дзеркал сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) та надвисокої роздільної здатності (НВРЗ), що підтверджується актом впровадження.

Особистий внесок здобувача. Здобувач приймав безпосередню участь в проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, в аналізі одержаних результатів та формуванні висновків. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримані здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертації належать автору.

Основна частина отриманих результатів доповідалась автором особисто на вітчизняних конференціях. У роботах, які опубліковані у

співавторстві, здобувачеві належить: [1, 7, 8] класифікація та огляд гіперспектральних пристроїв, огляд, аналіз та порівняння існуючих на цей час схем побудови зображуючих Фур'є-спектрометрів (ЗФС), аналіз принципів їх роботи, [2, 9] запропоновано новий метод проектування ЗФС на основі розділення його роботи на чотири етапи, [2, 9 – 11] запропонована математична модель роботи кожного з чотирьох етапів роботи ЗФС, [3] математична модель визначення деформацій робочої поверхні дзеркал вхідної оптики та дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал, [12] методика розрахунку полегшення для дзеркал вхідної оптики, [4] перевірка роботи програмного забезпечення, що створене на базі запропонованої математичної моделі визначення деформацій робочої поверхні дзеркал вхідної оптики, [13] проведення оптимізації полегшення для конкретної оптичної системи з позаосьовими сегментами осесиметричних дзеркал, [14] дослідження впливу кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал, [15] дослідження впливу різних типів полегшення на деформацію робочої поверхні дзеркал, [16] дослідження впливу додаткових елементів, що необхідно кріпити на дзеркало при виконанні контрольних операцій при використанні класичних методів контролю, [17] розроблений метод контролю форми великогабаритних дзеркал вхідної оптики, який не потребує допоміжних деталей, [5, 18] проведення дослідження впливу полегшення на деформацію осесиметричних дзеркал при кріпленні за три точки у задній стінці, [19] проведення моделювання запропонованих здобувачем систем підтримок дзеркал вхідної оптики, що необхідні для зменшення деформації їх робочої поверхні.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати доповідались та обговорювались на семи міжнародних науково-технічних конференціях: "Приладобудування: стан і перспективи" (м. Київ), "Optics and high technology material science" (м. Київ), "Авіакосмічне

приладобудування" (м. Київ), "Новые направления развития приборостроения" (м. Мінськ), Українська конференція з космічних досліджень (м. Одеса), "Спеціальне приладобудування: стан та перспективи" (м. Київ), "Космические технологии: настоящее и будущее" (м. Дніпро).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 робіт, з них 6 статей у фахових наукових виданнях України, з яких 1 стаття у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази Scopus та 13 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 6-ти додатків. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінок з обсягом основного тексту 115 сторінок, 90 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел з 95 найменувань, 6 додатків на 25 сторінці.

РОЗДІЛ 1: ОГЛЯД ЗОБРАЖУЮЧИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ТА МОЖЛИВОСТЕЙ ПОЛЕГШЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ВХІДНОЇ ОПТИКИ

1.1. Порівняння мультиспектральних та гіперспектральних приладів

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) за допомогою бортових видових (іконічних) засобів є одним з напрямків космічної діяльності, що найбільш інтенсивно розвивається [1, 2]. ДЗЗ на комерційній основі перетворюється за значущістю та об'ємом на другу після супутникових засобів зв'язку діяльність у космосі [3].

Починаючи з 60-х років ХХ століття і до сьогоднішнього часу тактико-технічні характеристики іконічних засобів постійно удосконалюються. Перші бортові сенсори оптичного випромінювання були фотографічними та забезпечували одержання панхроматичних (одноканальних) або кольорових зображень поверхні планети. На початку 1970-х років почали створювати оптико-електронні сенсори з багатьма робочими спектральними каналами формування зображень, що дозволяє реєструвати спектральну структуру випромінювання об'єктів. Перші такі сенсори, що називаються "мультиспектральними", були успішно виведені на орбіту 23.07.1972 р. на космічному апараті Landsat-1. На його борту було встановлено два різних за конструкціями сенсори, кожний з яких мав кілька робочих спектральних діапазонів. Один – RBV (Return Beam Vidicon) – мав два канали в видимій області: 475-575 нм і 580-680 нм і один ближній інфрачервоний канал 690-830 нм. Другий – сканер MSS (Multi Spectral Sensor) – мав робочі канали в таких спектральних інтервалах: зелений (0,5-0,6 мкм), червоний (0,6-0,7 мкм), і два ближні інфрачервоні (0,7-0,8 і 0,8-1,1 мкм). Просторова розрізненість зображень, що надавав Landsat-1, складала 60-80 м на місцевості. Космічний апарат (КА) Landsat-1 пропрацював на орбіті до

06.01.1978 р. Потім було послідовно запущено ще кілька КА серії Landsat з удосконаленими мультиспектральними сканерами на борту [4].

Використовуючи досвід, отриманий при розробці мультиспектральних сканерів, далі почали розробляти сенсори, що забезпечують формування зображення одночасно у багатьох (десятки-сотні) спектральних зонах (каналах), з типовою шириною кожної зони (інша назва – спектральна розрізненість) не більш ніж один-два десятків нанометрів. Такі сенсори отримали назву "гіперспектральних".

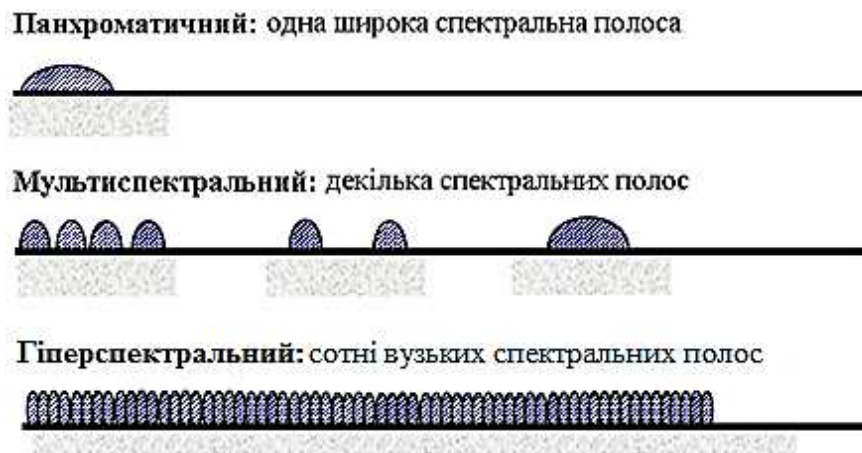


Рис. 1.1. Панхроматична, мультиспектральна та гіперспектральна система

1.2. Застосування та класифікація гіперспектральних приладів

Серед задач, які розв'язуються у різних галузях господарства системами ДЗЗ, можна виділити [5-9]: пошук корисних копалин та енергоносіїв, вивчення геотектонічних процесів, аналіз гірничих порід, картування, прогнозування врожаю, оцінювання ґрунтів та розвиток аграрних ресурсів, оцінювання запасів та класифікація лісів, вивчення та оцінювання океанічних ресурсів, виявлення забруднення та їх джерел, аналіз льодово-снігового покриву, вимірювання профілів атмосфери, аналіз та прогнозування кліматичних змін.

Всі гіперспектральні системи можна класифікувати за двома критеріями [10]:

- за способом формування двовимірного зображення;
- за способом спектральної селекції.

1.2.1. За способом формування двовимірного зображення

Формування зображення у площині приймача забезпечується з одного боку поступальним рухом носія (літака або космічного апарату), з іншого – скануванням смуги захвату або одночасної її реєстрації перпендикулярно до напрямку польоту. Існує чотири основні варіанти побудови сенсорів:

- whiskbroom (сканування поелементно);
- pushbroom (сканування вузькою смугою);
- windowing (сканування вікном);
- framing (по-кадрове формування зображення).

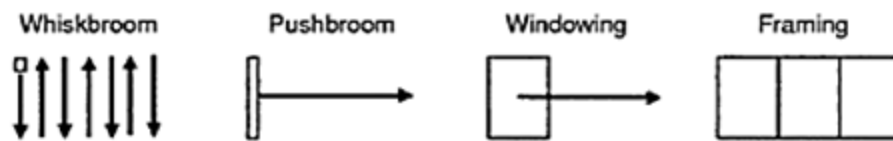


Рис. 1.2. Класифікація за способом формування двовимірного зображення

Таблиця 1.1

Порівняння способів формування двовимірного зображення [11]

Режим сканування	Переваги	Недоліки
whiskbroom	<ul style="list-style-type: none"> - Всі просторові точки спектрально обробляються однаково (тобто випромінювання від кожної точки на поверхні Землі проходить через одні і ті ж 	<ul style="list-style-type: none"> - Проекція одного пікселя на землі сильно змінюється по ширині смуги огляду. - Потрібне дзеркало для сканування¹; - Час спостереження одного

	<p>частини оптичного тракту), отже калібрування відбувається простіше;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Спектральне вимірювання відбувається миттєво. 	<p>елемента на Землі, дуже малий. На додаток до цього, у більшості приладів, які працюють у режимі whiskbroom, де є механічна система сканування, на початку і у кінці смуги огляду є періоди, під час яких сцена не спостерігається².</p>
pushbroom	<ul style="list-style-type: none"> - Спектральне вимірювання відбувається миттєво; - Якщо траєкторія носія прямолінійна, контролювати напрямок спостереження не треба. 	<ul style="list-style-type: none"> - Час спостереження одного елемента на Землі, дуже малий (але більший, ніж у whiskbroom), так як миттєве поле зору розтягнуте у напрямку смуги огляду (по одній координаті).
windowing	<ul style="list-style-type: none"> - Час спостереження одного елемента на Землі, великий, так як миттєве поле зору має дві координати. 	<ul style="list-style-type: none"> - Спектральне вимірювання відбувається протягом деякого часу, тому воно чутливе до змін у сцені; - Кут, під яким спостерігається один елемент на Землі, змінюється під час вимірювання, а, отже, може змінюватися і спектральний потік від нього. - Лінію візування треба контролювати для того, щоб весь час спостерігати одну зону протягом формування

		спектрального зображення, не зважаючи на рух носія вперед.
framing	<ul style="list-style-type: none"> - Час спостереження одного елемента на Землі, великий, так як миттєве поле зору має дві координати; - Якщо траєкторія носія прямолінійна, контролювати напрямок спостереження не треба. 	<ul style="list-style-type: none"> - Спектральне вимірювання відбувається протягом деякого часу, тому воно чутливе до змін у сцені; - Кут, під яким спостерігається один елемент на землі, змінюється під час вимірювання, а, отже, може змінюватися і спектральний потік від нього.

¹ Серед інших переваг режиму whiskbroom виділяють можливість отримати дуже великий кут огляду завдяки цьому дзеркалу.

² Зазначимо, що цей час може використовуватися для калібрування приладу за допомогою відомих джерел світла, що знаходяться у приладі.

1.2.2. За способом спектральної селекції

За способом спектральної селекції гіперспектральні прилади можна розділити на 3 типи, як показано нарис. 1.3.

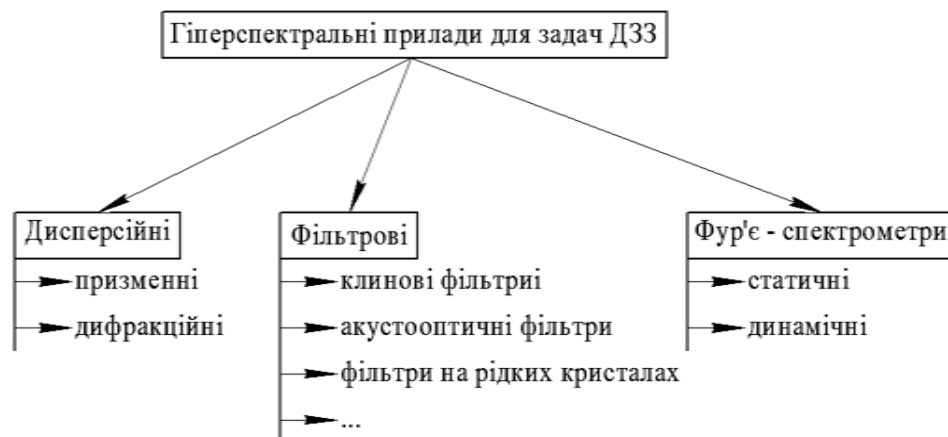


Рис. 1.3. Класифікація за способом спектральної селекції

Дисперсійні системи

Ця схема використовує для отримання спектральних зображень дифракційну решітку чи призму. Випромінювання, яке потрапляє на ці елементи розкладається у спектр. Зображення одного пікселя на Землі, розкладене у спектр, фокусується у площині приймача випромінювання у строку в залежності від довжини хвилі (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Схема з дифракційним елементом

Фільтрові системи

Прилади, побудовані на цій схемі, можуть використовувати в якості елемента, який розкладає випромінювання у спектр, оптичні, рідкокристалічні, акустооптичні та ін. фільтри. Використання таких систем дозволяє підвищити світлосилу та спростити конструкцію у порівнянні з системами з призмами та решітками.

Найпростішою фільтровою системою є система з клиновим фільтром, показана на рис.1.5.

Фур'є - спектрометри

Особливістю таких приладів є те, що вони реєструють не спектр підстилаючої поверхні, а інтерференційну картину. Відновлення спектру здійснюється шляхом використання зворотного перетворення Фур'є до сигналу, що зареєстрований матричним приймачем випромінювання.

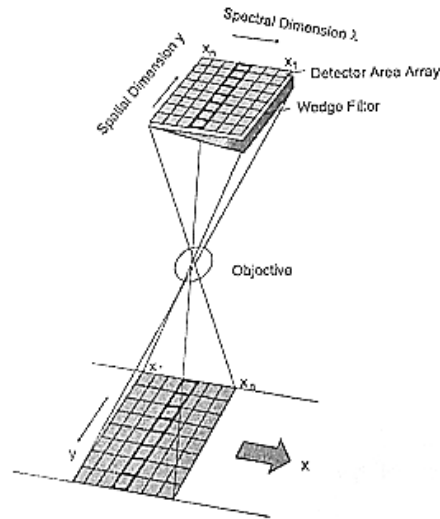


Рис. 1.5. Схема з клиновим фільтром

Таблиця 1.2

Порівняння способів спектральної селекції [10]

Спосіб селекції	Переваги	Недоліки
Дисперсійні системи	<ul style="list-style-type: none"> - Відносно легке калібрування у польоті¹; - Інструментальні шуми можуть бути сильно ослаблені при використанні кутових фільтрів (але погіршується коефіцієнт пропускання системи). 	<ul style="list-style-type: none"> - Обов'язково треба мати дві оптичні системи, перша для спряження об'єкта з вхідною щілиною спектрометра, друга для спряження цієї щілини з приймачем; - Якщо спектральний діапазон великий, то ефективність дифракційної решітки обмежена, а також через наявність великої кількості порядків дифракції потрібна додаткова спектральна фільтрація;

		<ul style="list-style-type: none"> - Призми мають кращий коефіцієнт пропускання та більш широкий спектральний діапазон роботи, але їх дисперсія залежить від довжини хвилі.
Фільтрові системи	<ul style="list-style-type: none"> - Можливо виміряти декілька спектральних каналів. - Відносно легке калібрування у польоті¹; - Для клинових фільтрів – простота схеми. 	<ul style="list-style-type: none"> - Часто у цих фільтрах може спостерігатися перекриття сусідніми каналами один одного. - Коефіцієнт пропускання фільтра за межами спектрального вікна пропускання є дуже малим.
Фур'є - спектрометри	<ul style="list-style-type: none"> - Широкий спектральний діапазон роботи самої системи²; - Мають дуже високу спектральну роздільну здатність. 	<ul style="list-style-type: none"> - Вимірювання спектрального діапазону відбувається до нульового хвильового числа, тому вимірюваний діапазон більший від використовуваного; - Наявність рухомого елемента у динамічних Фур'є-спектрометрах; - Просторове розділення сильно обмежене кількістю приймачів.
¹ Є дві причини: по-перше, спектральне калібрування можна провести за допомогою простого освітлення приладу джерелом, що має вузький лінійчатий спектр, а по-друге, схема приладу дозволяє відразу отримати реакцію кожного пікселя на потік, що вимірюється, тому при використанні		

джерела з відомими спектральними параметрами можна одразу отримати вихідний сигнал.

² Якщо використовується дзеркальна оптика, спектральний діапазон обмежує світлоподільна пластинка (якщо не використовується поділ хвильового фронту), або приймач.

Найбільш перспективними є Фур'є-спектрометри, бо вони маючи всі переваги класичних гіперспектральних систем (дисперсійних і фільтрових) перед мультиспектральними (отримання набагато більшої кількості інформації), мають ще і додаткові переваги перед класичними гіперспектрометрами [12]:

- велика світлосила – великий тілесний кут, у межах якого з площі кодуєчого пристрою може збиратися досліджуване випромінювання при тому самому відносному спектральному розділенні;
- мультиплексність – одночасна реєстрація всіх спектральних каналів;
- велика точність прив'язки шкали хвильових чисел;
- великий діапазон спектрального розділення, яке можна реалізувати;
- велика ширина спектрального інтервалу, який реєструється одночасно, який обмежується тільки пропусканням оптики та чутливістю приймача;
- значне зменшення необхідних об'єктивів (можлива відсутність щілини);
- можливість організувати режим накоплення сигналу.

1.3. Типи зображуючих Фур'є – спектрометрів

Розглянемо більш детально класифікацію та оптичні схеми ЗФС. Їх можна розділити на два основні типи, які розрізняються за способом одержання різниці ходу між променями, що інтерферують [13]:

1. Статичні (spatially modulated imaging spectrometer) – у них інтерферограма створюється та реєструється у вигляді нерухомої картини, а формування «куба даних» (з другою просторовою координатою) здійснюється при русі платформи зі спектрометром по орбіті, тобто при скануванні поверхні Землі.
2. Динамічні (temporally modulated imaging spectrometer) – у таких приладах різниця ходу променів, що інтерферують, змінюється механічним способом, наприклад, шляхом переміщення одного з дзеркал інтерферометра, а інтерферограма, що реєструється фотоелектричним способом, є електричним сигналом, що залежить від часу.

Окремо можна виділити поляризаційні та комбіновані Фур'є – спектрометри.

1.3.1. Статичні зображуючі Фур'є-спектрометри

Статичні Фур'є – спектрометри зазвичай будують на базі інтерферометра Сан'яка.

Класичний трикутний інтерферометр Сан'яка може бути або дзеркальний, або монолітний (рис. 1.6). Принцип роботи таких приладів наведено у роботах [14-17].

Вхідна оптика будує зображення підстилаючої поверхні у площині вхідної вузької прямокутної щілини 2. Ширина вхідної щілини дорівнює ширині пікселів на матричному приймачі 9, довжина щілини – висоті стовпців матриці. Розмір вхідної щілини можна змінювати, збільшення ширини щілини призведе до збільшення відношення сигнал/шум, але водночас до зменшення просторового розділення приладу. При великій ширині щілини зображуючий Фур'є – спектрометр перетворюється у звичайний Фур'є - спектрометр.

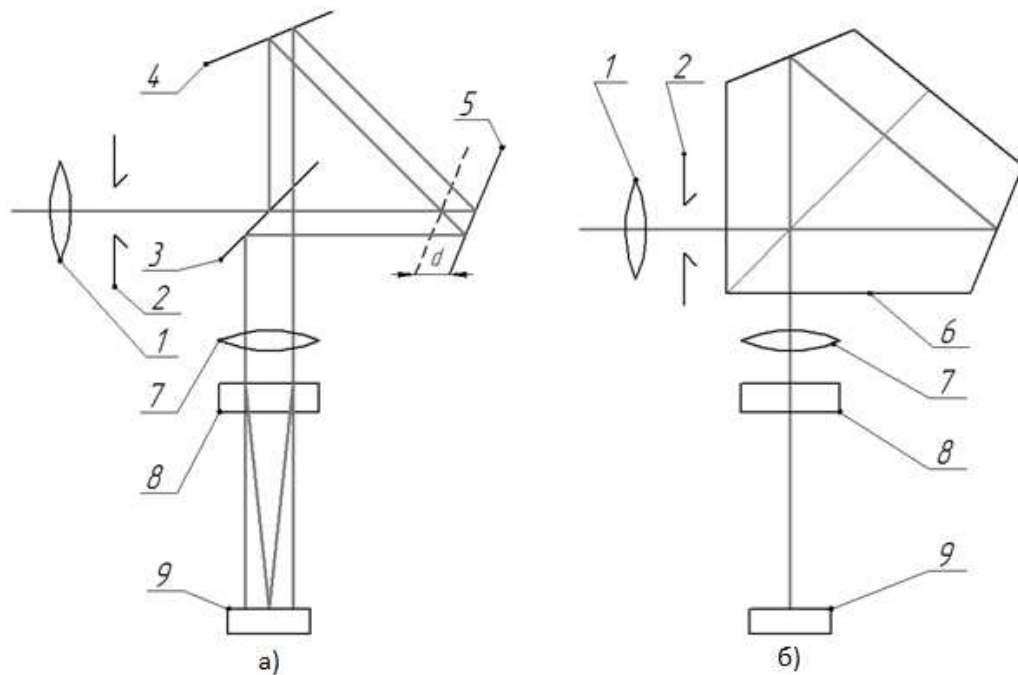


Рис. 1.6. Оптична схема дзеркального (а) та монолітного (б) трикутного інтерферометра Сан'яка: 1 – вхідна оптика; 2 – вхідна щілина; 3 – світлоділильна пластина; 4,5 – дзеркало; 6 – монолітний інтерферометр Сан'яка (склейка з двох пентапризм, на гіпотенузній грані – світлоділильне покриття); 7 – вихідна оптика; 8 – циліндрична оптика; 9 – матричний приймач випромінювання

Далі світлоділильна пластина у інтерферометрі розділяє вхідне випромінювання на два пучка, один з яких відбивається, а інший проходить через нього. Ці два пучка дають два зображення підстилаючої поверхні. Якщо інтерферометр симетричний, два зображення співпадають та інтерференційних ефектів нема. Але якщо одне з дзеркал (одна з граней призми) зміщене, тоді пучки будуть проходити різний шлях і два зображення підстилаючої поверхні будуть зміщені перпендикулярно до оптичної осі у різних напрямках. Таким чином, інтерферометр Сан'яка вносить поперечний зсув між когерентними пучками, що пройшли крізь нього. Ці два пучка будуть інтерферувати в задній фокальній площині вихідної оптики 7. При цьому передня фокальна площина вихідної оптики 7 співпадає з зображенням підстилаючої поверхні на вхідній щілині 2, тому після вихідної оптики 7

пучки розповсюджуються паралельно оптичній осі. Для того, щоб побудувати зображення вхідної щілини 2 у площині матричного приймача випромінювання 9, між вихідною оптикою 7 та матрицею 9 розміщують циліндричну оптику 8, причому матриця 9 знаходиться у її задній фокальній площині.

Вздовж стовпців матриці будується зображення щілини 2, тобто вузької полоси підстилаючої поверхні, що розміщена перпендикулярно напрямку зміщення носія. Просторове розділення по цій координаті визначається розміром пікселів у стовпцях матриці. Одночасно з цим вздовж рядків матриці реєструється інтерферограма (функція автокореляції) від кожної ділянки підстилаючої поверхні, розмір зображення якої відповідає одному пікселю матриці. Наступне відновлення інтерферограми перетворенням Фур'є дає спектральну інформацію для кожної ділянки підстилаючої поверхні. Друга просторова координата реєструється послідовно у результаті зміщення зображення сцени відносно вхідної щілини при зміщенні носія. Таким чином, такий прилад схожий на щілинний спектрометр: кожний рядок матриці буде містити спектр однієї ділянки підстилаючої поверхні у формі інтерферограми.

Перевагою дзеркальної схеми є те, що відстань між максимумами смуг можна довільно змінювати регулюючи зміщення одного з дзеркал. Підкреслюємо, що для отримання інтерферограми дзеркало не рухається, дзеркало зміщується до досягнення потрібної відстані між смугами, а потім закріплюється. Недоліком є чутливість до вібрацій.

Перевагою монолітної схеми є те, що вона не чутлива до роз'юстувань від вібрацій в процесі роботи, однак вона дорожча за дзеркальну схему та вимагає великої точності при виготовленні призми інтерферометра.

Інтерферометр Сан'яка може бути чотирикутний (рис.1.7) [18,19].

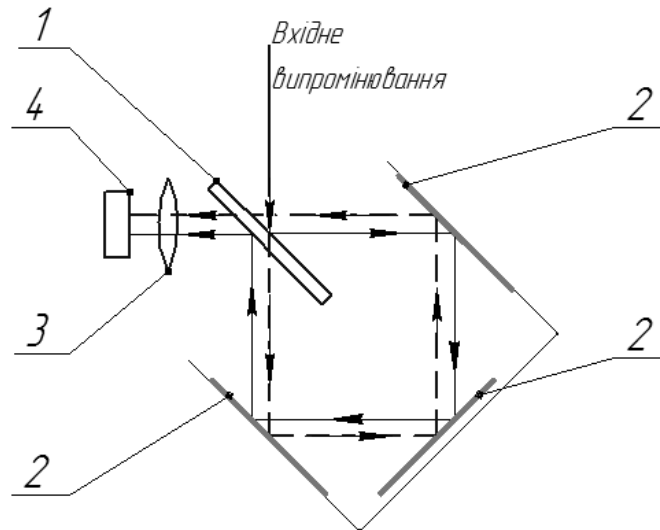


Рис. 1.7. Оптична схема чотирикутного інтерферометра Сан'яка: 1 – світлоділильна пластина; 2 – дзеркало; 3 – вихідна оптика; 4 – матричний приймач випромінювання

Інтерферометр має чотирикутну форму, містить три дзеркала, які знаходяться під кутом 90° один до одного, та світлоділильну пластину. На відміну від класичного інтерферометра Сан'яка, чотирикутна схема має меншу довжину ходу променів, що зменшує він'єтування. Випромінювання, що потрапляє у інтерферометр, розділяється на два пучка світлоділильною пластиною. Пучки проходять різні за довжиною шляхи та фокусуються на приймач випромінювання. Світлоділильну пластину та одне з дзеркал можна зміщувати за допомогою п'єзодвигунів. Світлоділильна пластина після розвороту на дуже малий кут закріплюється, що створює постійний градієнт різниці ходу вздовж рядків на матричному приймачі випромінювання. Завдяки цьому виникає інтерференційна картина.

У кожному кадрі кожна точка підстилаючої поверхні зображена на приймачі випромінювання з однією різницею ходу, тому один кадр не несе у собі спектральну інформацію. Для отримання інтерферограми з усіма можливими різницями ходу однієї точки на поверхні Землі необхідно сканувати поверхню Землі так, щоб у кожному наступному кадрі точка на

приймачі зміщувалася приблизно на один піксель. При цьому отримується певна кількість кадрів поверхні Землі. Ця серія кадрів і буде містити у собі інтерферограму з усіма можливими різницями ходу, а після перетворення - Фур'є - спектр даної точки.

1.3.2. Динамічні зображуючі Фур'є-спектрометри

Динамічні Фур'є – спектрометри звичайно будують на базі модифікацій інтерферометра Майкельсона. Даний інтерферометр у класичному вигляді показаний на рис. 1.8.

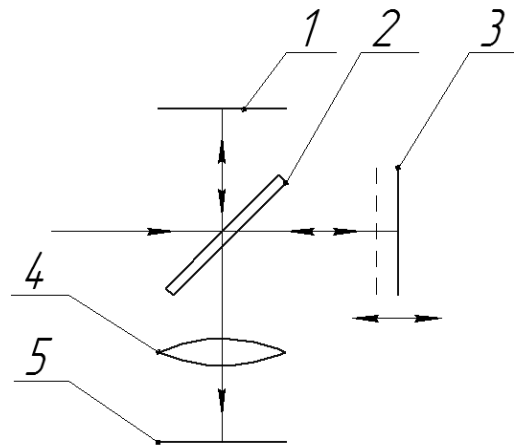


Рис. 1.8. Інтерферометр Майкельсона: 1 –нерухоме дзеркало; 2 – світлоділильна пластина; 3 – рухоме дзеркало; 4 – вихідна оптика; 5 – матричний приймач випромінювання

Інтерферометр Майкельсона складається зі світлоділильної пластини та двох дзеркал, одне з яких закріплене, а інше рухоме, яке рухається перпендикулярно оптичній осі інтерферометра та змінює різницю ходу променів. Для створення інтерференційної картини при всіх можливих різницях ходу потрібно спостерігати сцену деякий час, впродовж якого дзеркало пройде з одного крайнього положення в інше. Для нормального функціонування дзеркала повинні бути перпендикулярні оптичним осям інтерферометра. Якщо це не так, виникають похибки у вимірюванні. У цій

схемі додатково може застосовуватися лазер, який встановлений перед світлоділильною пластиною для точного вимірювання величини зміщення рухомого дзеркала.

Для покращення роботи приладу замість плоских дзеркал використовуються кутові відбивачі (рис. 1.9). Кут падіння променів на кутові відбивачі дорівнює куту відбивання від них незалежно від кута розміщення відбивачів, тому при їх використанні значно знижуються вимоги до точності їх встановлення.

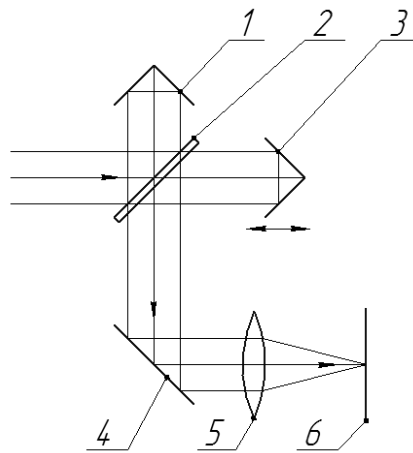


Рис. 1.9. Інтерферометр Майкельсона з кутовими відбивачами: 1 – нерухомий кутовий відбивач; 2 – світлоділительна пластина; 3 – рухомий кутовий відбивач; 4 – дзеркало; 5 – вихідна оптика; 6 – матричний приймач

Можливо також замінити кутові відбивачі на дифракційні решітки, які встановлені під деякими кутами до оптичних осей інтерферометра для підвищення роздільної здатності приладу [11].

У роботі [20] описаний варіант модифікованого інтерферометра Майкельсона з клиновидними призмами. Цей варіант наведено на рис.1.10рис.1.1.

Інтерферометр складається з вхідної оптики, світлоділительної призми, двох нерухомих дзеркал та двох клиновидних призм, одна з яких рухається для зміни оптичної різниці ходу. Для компенсації дисперсії, що вноситься призмами у одному каналі, у інший вводиться компенсаторна пластинка. У

фокальній площині вихідної оптики створюється інтерференційна картина. Інтерференційну картину та зображення одночасно реєструє матричний приймач випромінювання.

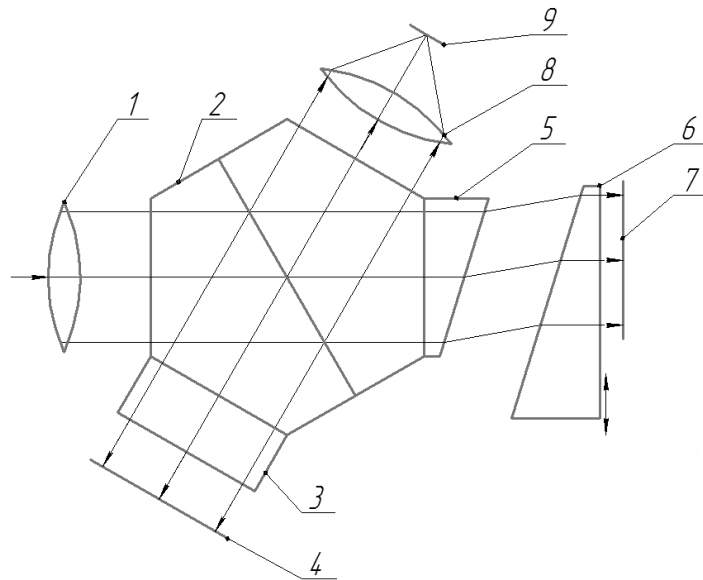


Рис. 1.10. Модифікований інтерферометр Майкельсона: 1 – вхідна оптика; 2 – шестикутна світлоділильна призма; 3 – компенсаторна пластинка; 4,7 – нерухоме дзеркало; 5 – нерухома клиновидна призма; 6 – рухома клиновидна призма; 8 - вихідна оптика; 9 – матричний приймач випромінювання

Перевагою такої схеми є менша чутливість до вібрацій та менша точність переміщення клину, ніж у схемах з рухомими дзеркалами.

1.3.3. Поляризаційні зображуючі Фур'є-спектрометри

Поляризаційні Фур'є – спектрометри звичайно будують на базі поляризаційних інтерферометрів. Один з варіантів схем такого інтерферометра представлений на рис. 1.11. [21].

Інтерферометр з подвійним променезаломленням складається з двох призм Воластона, які встановлені так, як показано на рис. 6. Випромінювання зі сцени потрапляє на поляризатор 1, що поляризує випромінювання під

кутом 45° до оптичних осей призм Воластона. Далі випромінювання, після проходження першої призми Воластона, ділиться на 2 пучки з однаковою інтенсивністю. Ці два пучки ортогонально поляризовані та розходяться. Після проходження другої призми Воластона два пучки колімуються та фокусуються вихідною оптикою 5 на матричний приймач 6, де спостерігається інтерференційна картина. Для зміни різниці ходу променів друга призма Воластона рухається перпендикулярно до оптичної осі спектрометра.

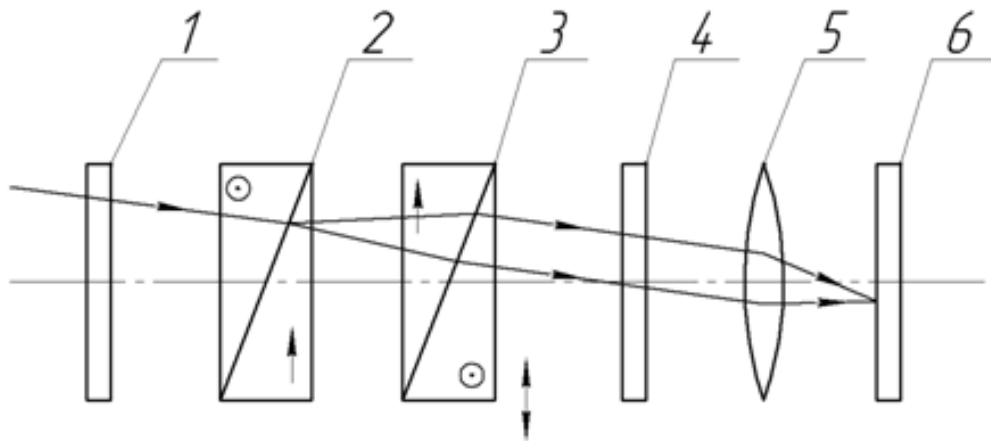


Рис. 1.11. Інтерферометр з подвійним променезаломленням: 1 - поляризатор 1; 2, 3 - призма Воластона; 4 - поляризатор 2; 5 - вихідна оптика; 6 - матричний приймач

Такий інтерферометр має всі переваги зображувачів Фур'є - спектрометрів, а також він нечутливий до вібрації. Точність встановлення оптичних компонентів у приладі, що побудований за цією схемою, на два порядки нижча, ніж вимагається у приладах, побудованих за традиційними схемами. Спектральний діапазон роботи приладу обмежений лише спектральним пропусканням оптики та спектральною чутливістю матричного приймача.

1.3.4. Комбіновані зображуючі Фур'є-спектрометри

Схема даного Фур'є – спектрометра представлена на рис.1.12рис.1.1.
[22].

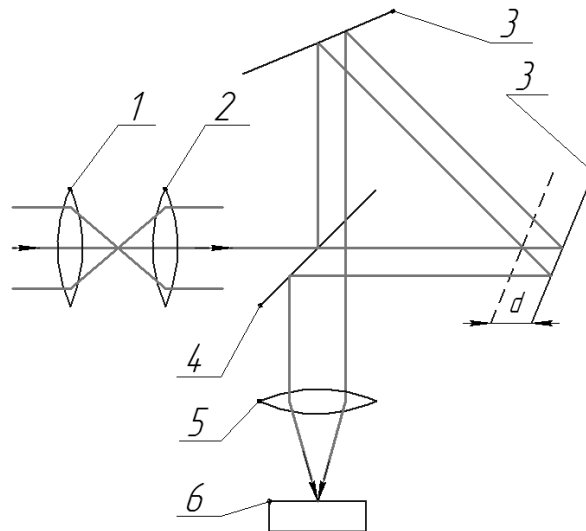


Рис.1.12. Комбінація ЗФС статичного та динамічного типів: 1 – вхідна оптика; 2 – коліматор; 3 – нерухомі дзеркала; 4 – світлоділильна пластина; 5 – вихідна оптика; 6 – матричний приймач випромінювання

Такий спектрометр представляє собою комбінацію спектрометрів статичного та динамічного типів. Вхідна оптика будує зображення підстилаючої поверхні у першу площину зображень. Далі коліматор колімує випромінювання і воно потрапляє у інтерферометр Сан'яка. Вихідна оптика фокусує отриману інтерферограму на матричний приймач випромінювання. По способу отримання різниці ходу ця схема схожа на ЗФС статичного типу, однак по способу реєстрації інтерферограми – на ЗФС динамічного типу.

1.3.5. Порівняння типів зображуючих Фур'єспектрометрів

У таблиці 1.3. наведено переваги та недоліки розглянутих оптичних схем ЗФС [23–25]. У Додатку А приведені деякі характеристики (платформа, тип, висота орбіти, просторове розділення, ширина лінії захвату, кількість

спектральних каналів та їх ширина, спектральний діапазон) деяких існуючих гіперспектральних сканерів [26-34].

Таблиця 1.3.
Порівняння ЗФС

Тип спектрометра	Переваги	Недоліки
Статичний дзеркальний (pushbroom)	Відсутність рухомих частин; відносно дешева та проста у виготовленні конструкція інтерферометра; можливість зміни відстані між максимумами у інтерференційній картині	Чутливий до роз'юстувань, вібрацій; використання циліндричної оптики; наявність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС
Статичний монолітний (pushbroom)	Відсутність рухомих частин, не чутливий до вібрацій	Відносно дорога та складна у виготовленні конструкція інтерферометра; використання циліндричної оптики; наявність щілини, що зменшує світлосилу у порівнянні з динамічними ЗФС
Динамічний (windowing)	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у порівнянні зі статичними ЗФС	Наявність рухомих частин; складний алгоритм обробки отриманих зображень
Поляризаційний (windowing)	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у	Наявність рухомих частин, хоча точність їх переміщення

	порівнянні зі статичними ЗФС	менша за точність, що потрібна у динамічних ЗФС
Комбінований (framing)	Відсутність щілини, що збільшує світлосилу у порівнянні зі статичними ЗФС; відсутність рухомих частин та циліндричної оптики	Складний алгоритм обробки отриманих зображень

1.4. Оптичні системи вхідної оптики зображуючих Фур'є-спектрометрів

Вхідна оптика ЗФС ДЗЗ є найбільшою та однією з найважливіших складових частин приладу [35] та присутня у всіх типах розглянутих систем. Вона повинна формувати зображення підстилаючої поверхні з якістю, що близька до дифракційної межі. При цьому до вхідної оптики пред'являють і інші вимоги, такі як широкий спектральний діапазон, визначене поле зору, обмеження по габаритним розмірам та вазі. Різні вимоги, що пред'являють до ЗФС (просторове розділення, кількість спектральних каналів, ширина полоси огляду та інше) вимагають вибору різних варіантів оптичних систем для вхідної оптики. Деякі варіанти вхідної оптики розглянуті у [36].

Всі існуючі оптичні системи можна розділити на такі три типи [29,36]:

- лінзові системи;
- дзеркально-лінзові системи;
- дзеркальні системи.

Розглянемо переваги та недоліки кожного з варіантів. Порівняння типів оптичних систем приведене у таблиці 1.4.

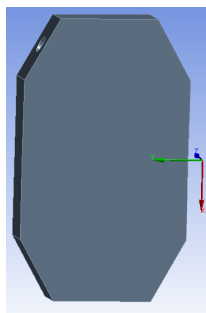
Таблиця 1.4.

Порівняння типів оптичних систем вхідної оптики ЗФС

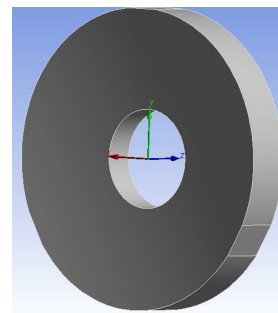
Тип системи	Переваги	Недоліки
Лінзові	Простота виготовлення та складання, великі кути поля зору	Велика довжина оптичної системи, що близька до значення фокусної відстані, хроматизм, велика чутливість до зміни температури. Для довгофокусних систем – труднощі виготовлення та велика вага внаслідок необхідного великого діаметру лінз, обмежений спектральний діапазон
Дзеркально-лінзові	Менші габаритні розміри та вага у порівнянні з лінзовими системами,	Чутливість до температур, хроматизм, який необхідно виправляти, обмежений спектральний діапазон
Дзеркальні	Широкий спектральний діапазон, найменші габаритні розміри та вага, невелика кількість елементів у схемі	Зниження модуляційно-передавальної функції на середніх частотах у системах з центральним екрануванням, складність юстування та виготовлення. Велика вага для довгофокусних систем (яку можна зменшити полегшенням)

Для сканерів ДЗЗ, особливо для ЗФС, найбільший інтерес представляють саме дзеркальні оптичні системи вхідної оптики через їх переваги – широкий спектральний діапазон та можливість побудови довгофокусних систем з невеликими габаритами.

У дзеркальних чи дзеркально-лінзових системах вхідної оптики ЗФС можуть бути застосовані два типи дзеркал: позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал (рис.1.13.а) та осесиметричні дзеркала (рис.1.13.б). При використанні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал відсутнє центральне екранування, яке знижує модуляційну передавальну функцію системи на середніх частотах. Але таке дзеркало складніше у виготовленні та контролі, так як відсутня прив'язка до оптичної вісі робочої поверхні дзеркала.



а)



б)

Рис.1.13. Дзеркала: а) позаосьовий сегмент осесиметричного дзеркала, б) осесиметричне з центральним отвором

При розробці оптичних систем для збільшення апертури приладу та його просторового розділення збільшують діаметр дзеркал, що в свою чергу значно збільшує вагу оптики та вартість виводу всього приладу в цілому на орбіту. Тому питання полегшення дзеркал вхідної оптики ЗФС космічного базування при зберіганні високої якості форми робочих поверхонь є актуальним питанням при розробці цих систем.

1.5. Полегшення дзеркал вхідної оптики

Задача полегшення дзеркал - це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатньої жорсткості та міцності,

що необхідна при виведенні системи на орбіту. Основним критерієм, по якому вибирається найкращий варіант полегшення, є деформація робочої поверхні, яка характеризується середньоквадратичним відхиленням хвильового фронту.

Розглянемо класичні варіанти полегшення дзеркал, які використовуються.

1.5.1. Класичні варіанти полегшення дзеркал

Спеціальний профіль задньої частини

Найпростішим типом полегшеного дзеркала є дзеркало зі спеціальним профілем задньої частини (англ. contoured back mirrors) [37]. Є три типи таких дзеркал (рис. 1.14): з одним прогином (симетричне) (1), з двома прогинами (2), подвійно ввігнуте (3). Такий тип полегшення дозволяє зменшити вагу дзеркала до 25% у порівнянні з циліндром зі співвідношенням діаметра до товщини 6:1. Таке дзеркала просте у виготовленні та встановленні, але дуже чутливе до змін температури через різну товщину матеріалу.

Двошарові дзеркала

Наступний тип полегшення – двошарові дзеркала (так звані «сандвічі», англ. sandwich mirrors) (рис. 1.15) [38]. Таке дзеркало представляє собою основну деталь з робочою поверхнею та вирізами, а також тильну пластину, що з'єднуються методом електроадгезії. Можливе також тришарове дзеркало, яке складається з тонкої передньої пластини з робочою поверхнею, тонкої задньої поверхні, що паралельна передній, та середньої частини з вирізами різної форми, що з'єднує обидві пластини. Полегшення дозволяє зменшити вагу дзеркала до 40-20% у порівнянні з циліндром зі

співвідношенням діаметра до товщини 6:1. Можливе ще більше полегшення, але при цьому набагато зростають ризики та вартість виробництва. Такий тип полегшення має найбільшу жорсткість серед усіх типів полегшення, але його складно виготовити та закріпити.

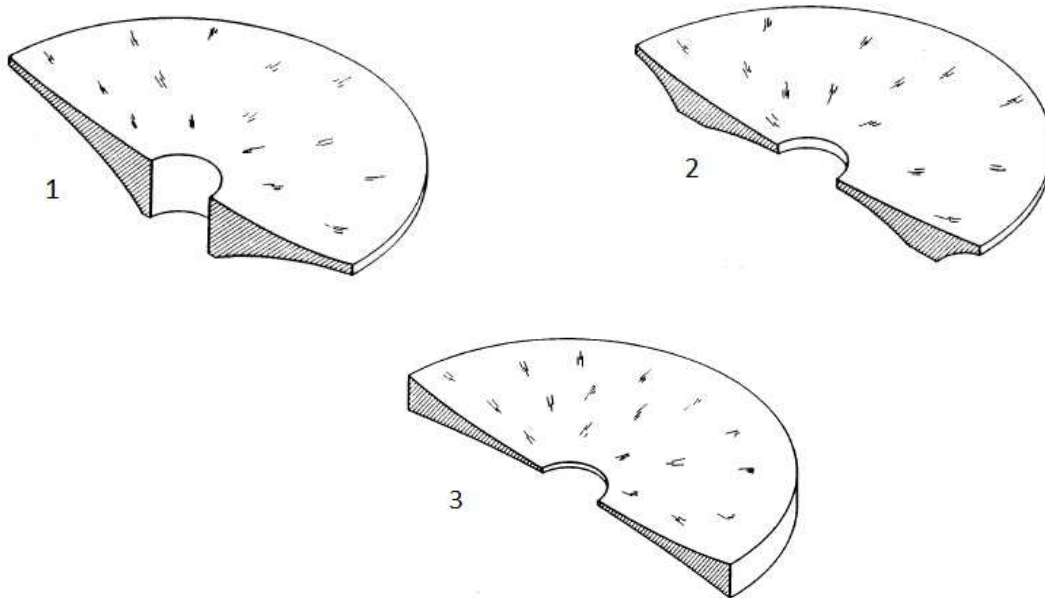


Рис. 1.14. Дзеркало зі спеціальним профілем задньої частини

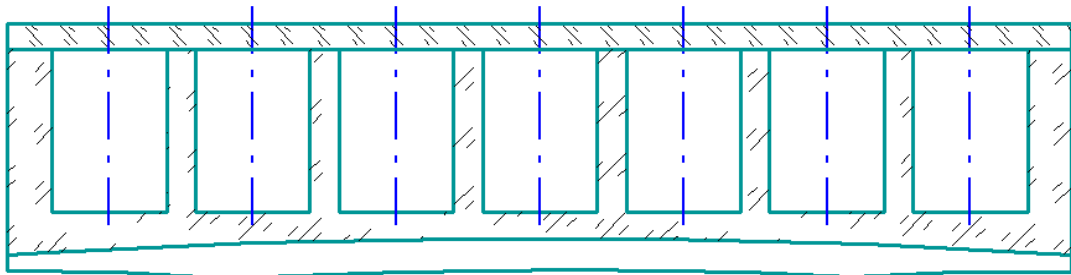


Рис.1.15. Двошарове дзеркало

Дзеркала з відкритою задньою частиною

Наступний тип – дзеркала з відкритою задньою частиною (англ. open-back mirrors) (рис.1.16) [38]. Цей тип дзеркала полегшується з тильної сторони вибірками різної форми (трикутні, чотирикутні, шестикутні, круглі, та ін.). По зменшенню маси такий тип полегшення та «сандвічі» майже

однакові, однак жорсткість найнижча. Такі дзеркала дешевші за «сандвічі», однак дорожчі за дзеркала зі спеціальним профілем задньої частини. Закріплюються досить легко.

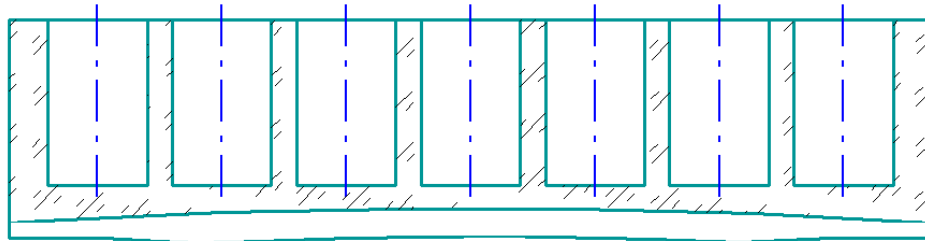


Рис.1.16. Дзеркало з відкритою задньою частиною

Проміжний варіант полегшення

Також можливий проміжний тип полегшення дзеркал, який представлено на рис.1.17. Дзеркало, при використанні такого типу полегшення виготовляється з однієї деталі. Полегшення представляє собою отвори більшого розміру у середині деталі та меншого розміру у задній стінці (ЗС) (через які фрезою роблять внутрішні розміри). В якості внутрішніх отворів можуть бути, наприклад, круглі або шестикутні при круглих отворах у ЗС.

У таблиці 1.5 наведено порівняння деяких характеристик для дзеркала зі спеціальним профілем задньої частини, двошаровим дзеркалом та дзеркалом з відкритою задньою частиною.

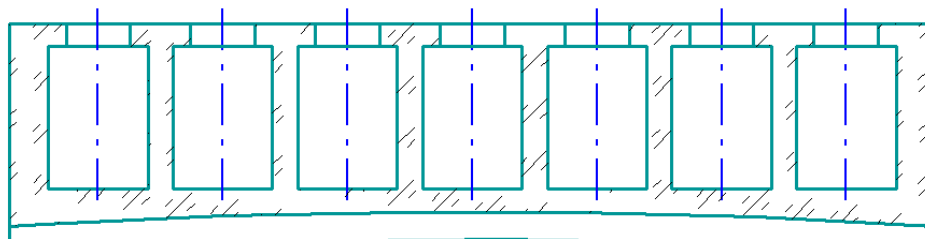


Рис. 1.17. Проміжний варіант полегшення

Таблиця 1.5.

Порівняння видів полегшення

Тип полегшення	contoured back mirrors	sandwich mirrors	open-back mirrors
Вага полегшеного дзеркала відносно не полегшеного	25%	40-20%	40-20%
Жорсткість конструкції	середня	велика	низька
Чутливість робочої поверхні до температури	велика	середня	низька
Важкість встановлення	низька	велика	середня
Важкість виготовлення	низька	велика	середня

1.5.2. Відомі дослідження полегшення дзеркал

Полегшення та варіанти кріплення дзеркал вхідної оптики розглядаються у багатьох джерелах. Розглянемо результати деяких досліджень.

У [38] розглядаються майже всі розглянуті класичні типи полегшення. Показано, що трапецеїдальні вирізи, при інших рівних умовах, краще ніж кільцеві. Також розглядається тип кріплення за три отвори у ЗС.

У циклі публікацій [39–42] розглядається вісесиметричне дзеркало з проміжним варіантом полегшення (рис. 1.17). В якості внутрішніх отворів полегшення вибрані шестикутні, в якості вирізів у ЗС вибрані круглі отвори. На рис. 1.18 представлена модель дзеркала з кріпленням на біподи, що

розглядається. У циклі публікацій розглядаються такі питання: вплив власних частот на деформацію дзеркала, дослідження параметрів полегшення для конкретної системи та їх вплив на деформацію робочої поверхні дзеркала, дія деформації робочої поверхні дзеркала на аберації, що будуть вноситися у оптичну систему та перевірка отриманих теоретичних даних при виготовленні реального зразка. У циклі публікацій більша увага приділена розробці нового типу кріплення та дослідження його впливу на деформацію робочої поверхні дзеркала.

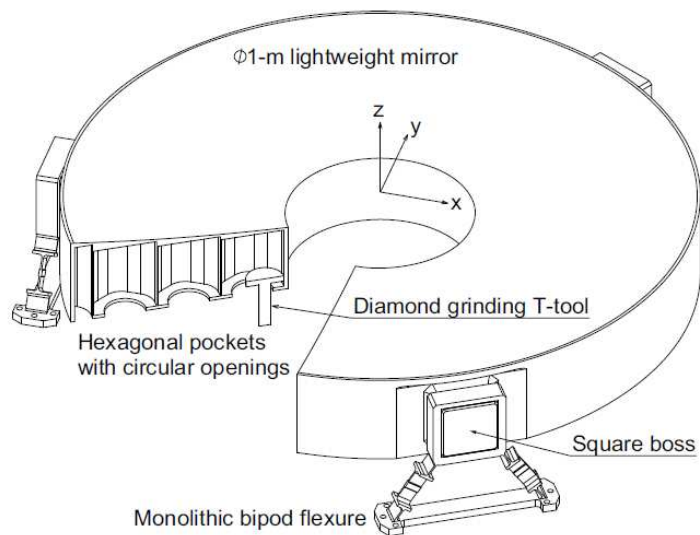


Рис.1.18. Дзеркало з проміжним варіантом полегшення з кріпленням на біподи

У роботах [43–45] розглядаються конкретні системи з використанням позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал та обрані варіанти полегшення (рис.1.19). Також розглядаються процеси виготовлення та контролю складових частин оптичного сканера та результати розробки самого сканера. В той же час дослідженню впливу полегшення на деформацію дзеркальної поверхні та методам її розрахунку приділяється мало уваги.

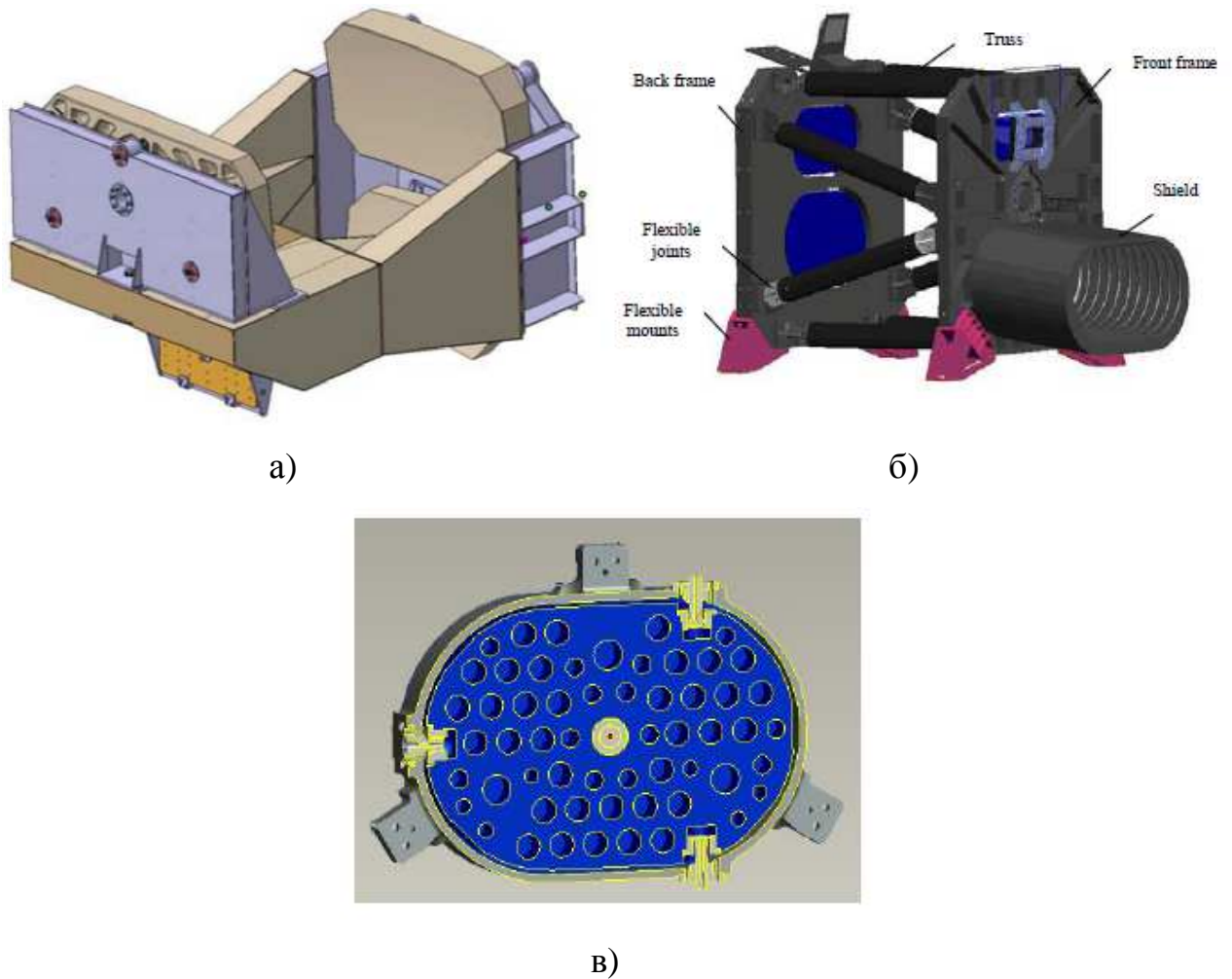


Рис.1.19. Умовно децентровані оптичні системи (а, б) та одне з позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал (в)

У [46] розглядаються можливості зменшення ваги дзеркала при використанні різних отворів полегшення (рис.1.20 а). У [47] розглядаються різні типи полегшення (рис.1.20 б) та їх вплив на власні частоти дзеркала. При обох дослідженнях вплив кріплення та методика дослідження не розглядається.

У публікаціях [48–50] приведені результати дослідження впливу прискорень у різних напрямках на деформацію дзеркальної поверхні, результати дослідження конкретного дзеркала та дослідження впливу положення кріплення (біподів) на деформацію робочої поверхні. На рис.1.21 представлена одна з моделей, яка досліджується.

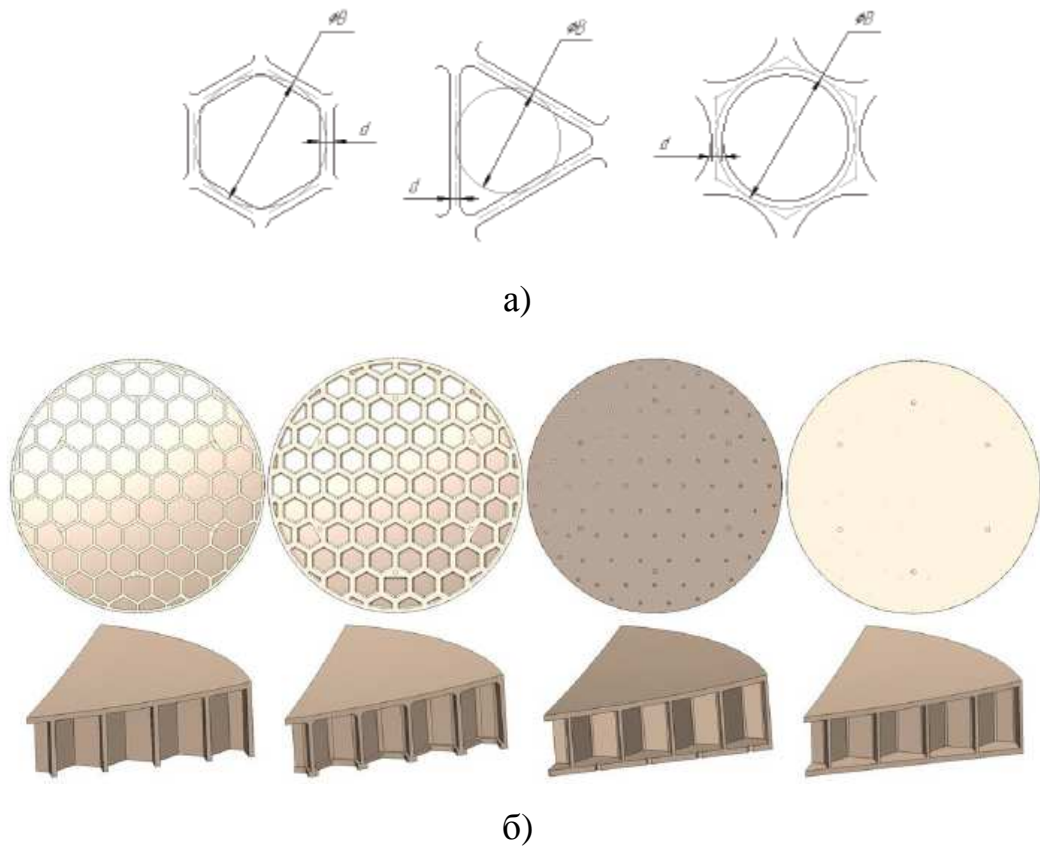


Рис.1.20. Різні отвори полегшення (а) та типи полегшення (б)

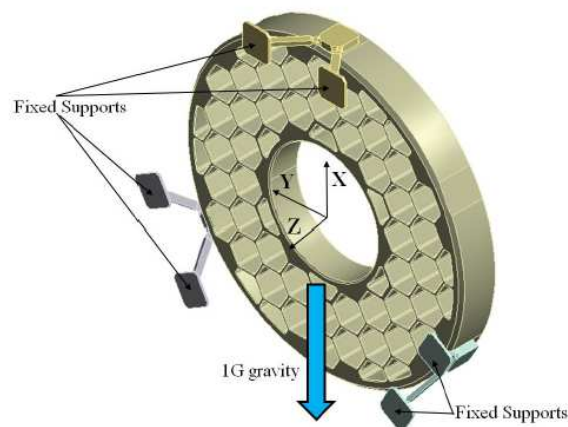


Рис.1.21. Модель для дослідження дії прискорень

У більшості розглянутих літературних джерелах для дослідження обираються дзеркала з шестикутними отворами полегшення та з кріпленням на біподи. Однак у статтях наводяться дослідження для конкретних систем, або інформація щодо процесів виготовлення та контролю дзеркал.

Дослідженню впливу геометричних параметрів полегшення дзеркала, самого дзеркала та його кріплення приділяється дуже мало уваги.

1.6. Типи аналізу, що використовуються при моделюванні впливу зовнішніх факторів на дзеркала вхідної оптики

Під час розробки складних оптичних систем, які в своєму складі містять полегшені дзеркала, а особливо систем космічного базування, необхідно проводити комп'ютерне моделювання. Подібне моделювання дозволяє суттєво зменшити час та вартість розробки будь-яких систем та показати слабкі місця системи. На сьогоднішній день існує велика кількість комп'ютерних програм кінцево-елементного аналізу (наприклад SolidWorks, Ansys тощо), за допомогою яких можна провести аналіз впливу зовнішніх факторів на систему, що досліджується. Проте, в таких програмах не передбачена можливість проведення оптичного аналізу (дослідження якості зображення) та імпорту результатів розрахунку у спеціалізовані оптичні програми.

Під час моделювання елементів оптичних систем сканерів дистанційного зондування Землі, розробники використовують переважно такі основні типи аналізу [51, 52]:

1. частотний аналіз – визначення перших власних частот коливання оптичних та механічних елементів;
2. механічний аналіз – дослідження дії сили тяжіння та інших сил;
3. температурний аналіз – аналіз градієнта температур усередині оптичних компонентів, що створюється під впливом зовнішніх факторів;
4. комбінований аналіз – механічний аналіз з урахуванням зміни розмірів елементів під впливом температурних градієнтів.

Перший тип аналізу можливо повністю провести у програмах кінцево-елементного аналізу. Інші типи аналізу також потребують використання програм кінцево-елементного аналізу. Однак результати проведеного аналізу

(у вигляді зсуву вузлів сітки елемента або значень температури у них) неможливо безпосередньо імпортувати в програми для оптичного аналізу. Через це дослідження якості зображення, сформованого деформованими компонентами, є дуже складною задачею.

Існують деякі програми (наприклад, COMSOL Multiphysics), у яких можливо провести комплексний аналіз впливу зовнішніх факторів на оптичні характеристики [53]. Однак можливості таких програм обмежені.

Для імпорту результатів кінцево-елементного аналізу у системи оптичного аналізу створено дуже мало спеціалізованих програм. Однією з таких програм є комерційний пакет SigFit. Даний програмний пакет дозволяє зв'язати кінцево-елементний аналіз, який виконано у програмному забезпеченні "MD Nastran" [54] або "ANSYS Workbench" [55] з оптичними програмами. Зазначений програмний пакет дозволяє імпортувати у програми оптичного аналізу результати моделювання специфічних систем, таких як дифракційні решітки [56], великогабаритні сегментовані дзеркала [57], адаптивні дзеркала [58], та інше. Він використовує досить складний математичний апарат, заснований на розрахунку двопроникнення, що виникає у матеріалі елементів під дією зовнішніх факторів [59]. Такий аналіз важливий для систем, у яких критичним є поляризація випромінювання та форма хвильового фронту [59].

Але для більшості систем поляризація та форма хвильового фронту не є критичними. Також, на етапах вибору типу полегшення та його дослідження необхідний швидкий алгоритм для проведення оптимізації великої кількості параметрів.

1.7. Висновки до розділу 1

Космічні системи ДЗЗ дозволяють вирішувати величезну кількість задач у різних галузях знань. Такі системи, розроблені для інших умов зйомки, можуть також застосовуватися для дистанційного зондування інших планет сонячної системи.

В залежності від поставлених задач та технічних вимог, системи ДЗЗ можуть використовувати різні принципи спектральної селекції. Були розглянуті їх переваги та недоліки та встановлено, що використання гіперспектральних систем (зображуючих Фур'є - спектрометрів) є найбільш перспективним. Такі системи забезпечують формування зображення одночасно у багатьох (десятки-сотні) спектральних зонах (каналах), з типовою шириною кожної зони (інша назва – спектральна розрізненість) не більш ніж один-два десятків нанометрів. Було також проведено порівняння способів формування двовірного зображення, що можуть бути застосовані у ЗФС.

Зроблено огляд робіт вітчизняних та зарубіжних авторів, присвячених оптичним схемам ЗФС, та встановлено, що їх можна розділити на два основні типи, що розрізняються за способом одержання різниці ходу між променями, що інтерферують: статичні та динамічні. Окремо можна виділити поляризаційні та комбіновані ЗФС. Проведено аналіз оптичних схем та встановлено, що на даний час значна увага приділяється ЗФС статичного типу, через їх переваги у порівнянні з ЗФС динамічного типу (відсутність рухомих частин, нечутливість до вібрацій, відносна дешевизна). Основна частина ЗФС, що зараз використовується, побудована на основі інтерферометра Сан'яка. У таких системах використовується "pushbroom" сканування (сканування вузькою смугою). При такому скануванні спектральне вимірювання відбувається миттєво (воно не чутливе до змін у сцені), однак час спостереження одного елемента на Землі дуже малий.

Однією з найважливіших частин ЗФС є вхідна оптика, що будує зображення підстилаючої поверхні на щілині або у площині проміжного зображення. Для отримання якісного зображення вхідна оптика повинна формувати зображення підстилаючої поверхні з якістю, що близька до дифракційної межі. Всі існуючі оптичні схеми вхідної оптики можна поділити на три типи: лінзові, дзеркально-лінзові та дзеркальні системи. Аналіз показав, що у більшості ЗФС, що використовуються, вхідна оптика будується на базі дзеркальної вхідної оптики через такі переваги: широкий спектральний діапазон та можливість побудови довгофокусних систем з невеликими габаритами.

Однак для збільшення просторового розділення та світлосили приладу в цілому збільшують діаметр головного дзеркала вхідної оптики. Це призводить до великого росту ваги оптики. Тому при розробці вхідної оптики треба використовувати полегшені дзеркала.

Аналіз літературних джерел показав, що питанням полегшення оптики займається багато організацій. Однак у літературі приводяться в основному результати досліджень деформації робочих поверхонь дзеркал при полегшенні конкретних систем або вимірів на виготовлених зразках. Комплексному аналізу впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення та їх типів на деформацію приділяється дуже мало уваги. Не приділяється також увага порівнянню можливостей полегшення для різних типів дзеркал: осесиметричних та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал. Також мало уваги приділяється методикам дослідження та математичним моделям для визначення деформації робочих поверхонь дзеркал.

Тому метою подальших досліджень є: забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

Мета досягається вирішенням наступних задач:

1. Обґрунтувати необхідність зменшення ваги вхідної оптики на основі порівняльного аналізу оптичних схем сучасних ЗФС космічного базування;
2. Дослідити математичну модель роботи ЗФС;
3. Розробити математичну модель визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
4. Розробити методику та провести комплексне дослідження впливу зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС;
5. Встановити комплекс залежностей впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики на деформацію їх робочої поверхні;
6. Провести експериментальну перевірку розробленої математичної моделі для визначення деформації робочих поверхонь дзеркал.

РОЗДІЛ 2: МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ЗОБРАЖУЮЧИХ ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ДЗЕРКАЛ ЙОГО ВХІДНОЇ ОПТИКИ

2.1. Математична модель роботи зображуючого Фур'є-спектрометра: вихідні положення

Так як характеристики оптико-електронної системи ЗФС залежать від багатьох факторів, тому необхідно створити математичну модель, що могла б врахувати вплив більшості факторів на характеристики ЗФС. Для цього роботу ЗФС можна умовно розділити на чотири етапи [60, 61]:



Рис. 2.1. Чотири етапи роботи ЗФС

Початковим етапом розробки ЗФС є визначення кола задач, для вирішення яких він буде використовуватися. На цьому етапі визначається спектральний діапазон роботи та кількість необхідних спектральних каналів. Потім задається висота орбіти та вибирається приймач випромінювання.

Після визначення цих параметрів можна переходити до кожного з етапів роботи для статичного та комбінованого ЗФС, згідно етапів на рис. 2.1. Розглянемо етапи докладніше [62, 63].

2.2. Формування зображення у площині вхідної щілини

Вхідна оптика будує зображення підстилаючої поверхні у площину вхідної діафрагми. Для статичного ЗФС, який працює у режимі pushbroom,

вхідна діафрагма представляє собою вузьку щілину, ширина якої дорівнює ширині пікселів на матричному приймачі, а довжина – висоті стовпців. Для динамічного (windowing) та комбінованого (framing) ЗФС вхідна діафрагма представляє собою прямокутник.

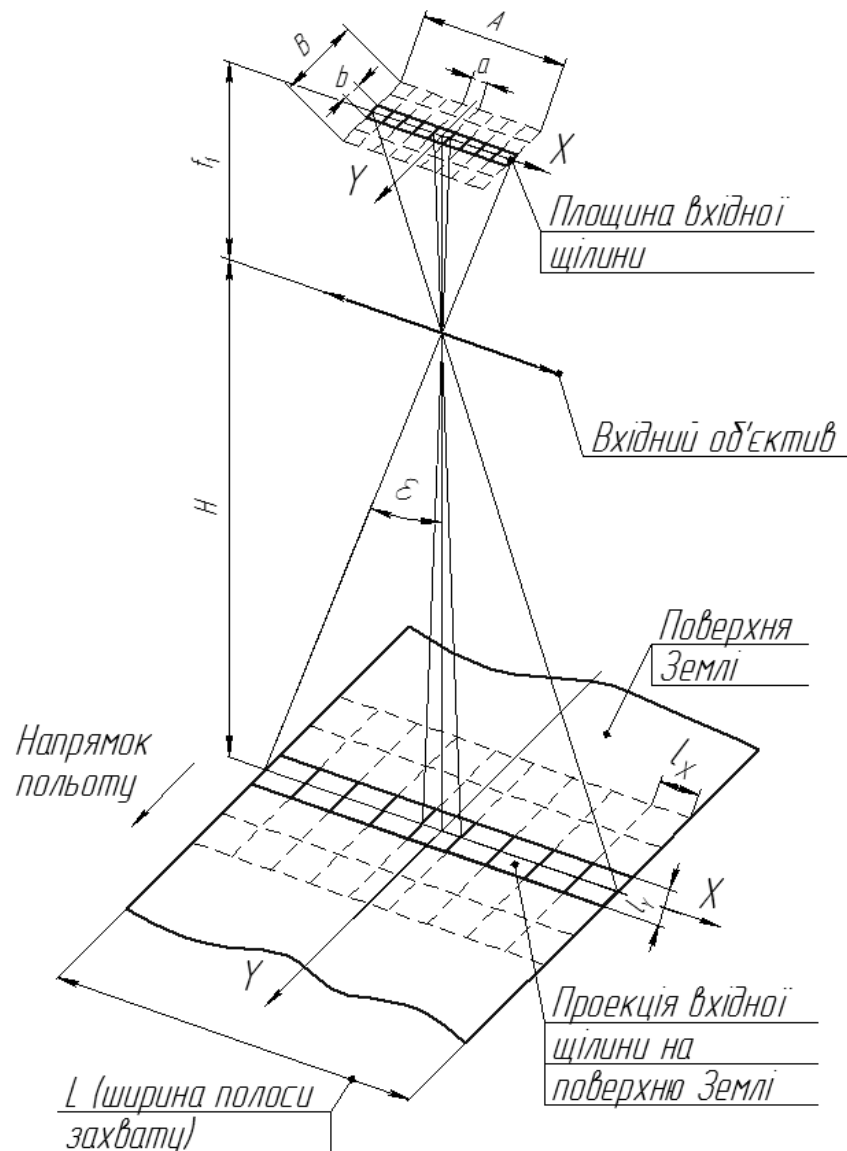


Рис. 2.2. Формування зображення ЗФС

Математична модель формування зображення у площині вхідної щілини ЗФС майже однакова для всіх типів приладів. Така модель дозволяє розрахувати наступні параметри приладу:

- фокусну відстань об'єктива. Її величина знаходиться із умови синхронізації роботи приймача випромінювання та режиму польоту

космічного апарату. За час зчитування одного кадру, зображення поверхні Землі має зміститися в площині матричного приймача випромінювання на розмір пікселя;

- поле зору приладу (виходячи з розміру приймача випромінювання);
- розмір проекції пікселя на поверхні Землі (виходячи з висоти орбіти космічного апарату, параметрів приймача випромінювання);
- ширину полоси захвату (виходячи з поля зору та висоти орбіти).

Як вхідні дані модель використовує висоту орбіти космічного апарату та параметри приймача випромінювання.

Розглянемо розрахунок кожного з параметрів.

Фокусну відстань вхідного об'єктива (f) можна визначити за допомогою формули [64]:

$$f = \frac{2A}{D} H \cos \vartheta (1 + \operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{tg}^2 \vartheta),$$

де D – лінійне розділення на місцевості, м, γ та ϑ – кути тангажа та крену космічного апарату (КА) під час проведення спостереження, A – лінійний розмір фоточутливої матриці матричного приймача випромінювання, H – висота польоту космічного апарату.

Також на цьому етапі розраховується поле зору вхідного об'єктива виходячи з його фокусної відстані та розмірів фоточутливої матриці матричного приймача випромінювання:

$$\varepsilon = \arctg \frac{A}{2f}$$

Використовуючи значення висоти польоту КА, фокусної відстані та розмірів матричного приймача випромінювання можна визначити проекцію одного пікселя (l_x, l_y) на поверхню Землі:

$$l_x = H \frac{a}{f}, \quad l_y = H \frac{b}{f},$$

де $a \times b$ – розміри пікселя.

Ширину полоси захвату можна визначити через фокусну відстань:

$$L = H \frac{A}{f}$$

A – довжина приймача випромінювання у напрямку, що перпендикулярний напрямку польоту КА.

Ширину полоси захвату також можна визначити через кут поля зору об'єктива (рис.2.3).

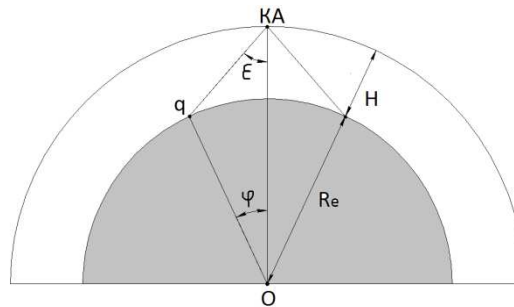


Рис. 2.3. Визначення ширини полоси захвату через кут поля зору об'єктива; φ – геоцентричний кутовий розмір полоси огляду.

Кутове поле зору КА – це конус з вершиною у КА (половина кута при вершині - ε) та віссю, що направлена по вертикалі

$$\varphi = \arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R_e} \right) \sin \varepsilon \right] - \varepsilon$$

Виразимо кут ε через φ :

$$\varepsilon = \arctg \frac{\sin \varphi}{\left(1 + H/R_e \right) - \cos \varphi}$$

Висоту польоту КА H можна записати як:

$$H = R \left(\frac{\sin(\varphi + \varepsilon)}{\sin \varepsilon} - 1 \right)$$

Для значень, що розглядаються ($H < 1000$ км, $\varepsilon < 45^\circ$) кут φ не перевищує 10° , тому можна розглядати, що $\sin \varphi \approx \varphi$ і $\cos \varphi \approx 1$. Тоді отримуємо:

$$\varphi \approx \frac{H}{R_e} \operatorname{tg} \varepsilon$$

При русі КА з полем зору 2ε , він «бачить» на поверхні Землі полосу огляду з геоцентричною шириною 2φ , яка симетрична відносно напрямку польоту. Лінійний розмір полоси огляду можна визначити як:

$$L = R_e 2\varphi$$

або

$$L = 2R_e \left\{ \arcsin \left[\left(1 + \frac{H}{R_e} \right) \sin \varepsilon \right] - \varepsilon \right\} \approx 2H \operatorname{tg} \varepsilon$$

2.3. Формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання

На другому етапі розраховується інтенсивність інтерференційної картини на матричному приймачі випромінювання. Для цього розглянемо більш детально хід променів та процес формування зображення у ЗФС статичного та комбінованого типу. Розгляд можна провести по двом площинам, розділивши таким чином дві функції: зображувальну та “спектральну” (реєстрацію інтерферограми). Хід променів у цих площинах представлений на рис.2.4 . На рис.2.4 *a* представлена площина, у якій вхідна щілина розміщена короткою стороною. Так як одне з дзеркал зміщене (інтерферометр не симетричний), у цій площині інтерферометр розділяє кожний промінь на два. Ці промені будуть зміщені у різних напрямках відносно променя, який би розповсюджувався за відсутності інтерферометра. Створюється два зображення щілини, які фокусуються вихідною оптикою на матричний приймач випромінювання. Розподіл інтенсивності на матричному приймачі випромінювання представляє собою інтерференційну картину. Циліндрична оптика у цій площині діє як плоскопаралельна пластинка для променів, що знаходяться на оптичній осі. Інші промені вона буде фокусувати в лінії перпендикулярно площині рис.2.4 *a*. Випромінювання на кожній з цих ліній буде мати однакову різницю ходу. В залежності від номера лінії, починаючи від оптичної осі (номер стовпця матриці), оптична

різниця ходу буде поступово змінюватися (однаково в обох напрямках від оптичної осі), досягаючи максимального значення на крайній лінії (на крайньому стовпцю матриці).

На рис.2.4 б представлена площина, у якій вхідна щілина розміщена довгою стороною. Циліндрична оптика у цій площині діє як лінза. У цій площині реєструється зображення вузької полоси підстилаючої поверхні, що формується вхідною оптикою на щілині. Це зображення буде знаходитися на одному стовпці матриці у площині рисунка.

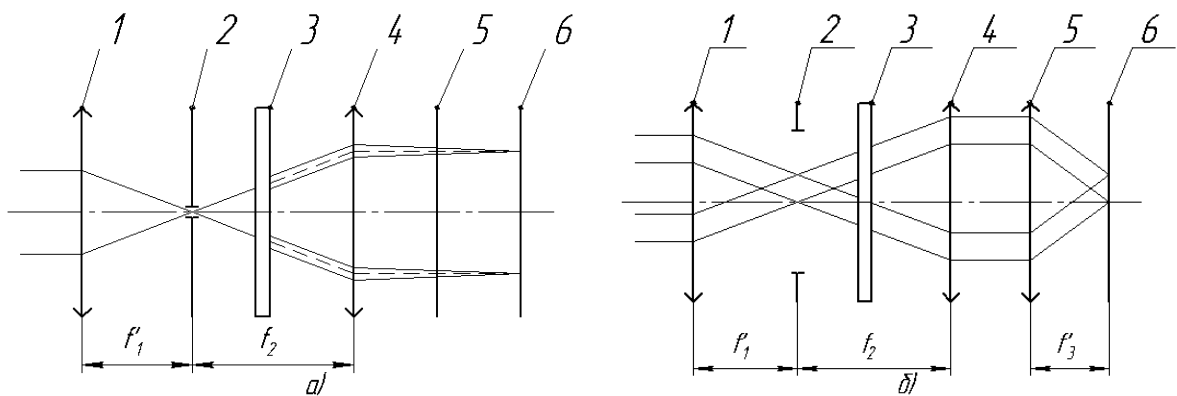


Рис. 2.4. Хід променів у статичному Фур'є – спектрометрі на базі інтерферометра Сан'юка: 1 – вхідна оптика (f_1); 2 – вхідна щілина; 3 – інтерферометр; 4 – вихідна оптика (f_2); 5 – циліндрична оптика (f_3); 6 – матричний приймач випромінювання

На рис. 2.5. показано формування інтерференційної картини та зображення на матричному приймачі в залежності від розміщення та кута нахилу до оптичної осі променів на щілині. Зображення вузької полоси підстилаючої поверхні, що вирізається щілиною, створюється на центральному рядку матриці променями «б» (координати $(0; y)$). Оптична різниця ходу поступово змінюється в обох напрямках від нульового (координати $(0; y)$) до максимального значення (промені «а» та «в») на крайніх стовпцях матриці вздовж осі x .

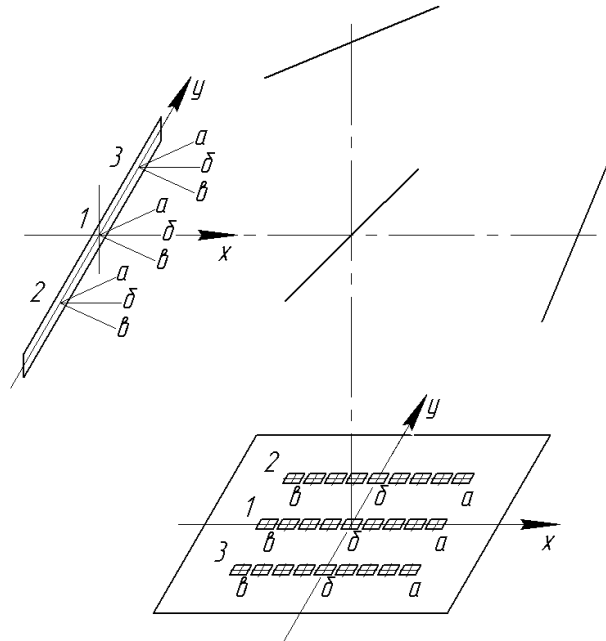


Рис.2.5. Формування інтерференційної картини та зображення на матричному приймачі випромінювання

Розглянемо також трикутний інтерферометр Сан'яка, у якому і відбувається створення двох зображень вхідної щілини (рис. 2.6). Він складається з світлоділильної пластинки 1 та двох дзеркал 2 та 3, одне з яких зміщене на величину d . Будь-який промінь, що входить у інтерферометр, роздвоюється. Ці промені будуть зміщені у різних напрямках відносно променя, який би розповсюджувався за відсутності зміщення d . Відстань c між двома розділеними променями розраховується з трикутника ABC (рис. 2.6) по формулі:

$$c = 2 \cdot \sin 45^\circ \cdot d = \sqrt{2} \cdot d.$$

Розглянемо формування оптичної різниці ходу у інтерферометрі. Плоска хвиля, що розповсюджується вздовж оптичної осі, буде мати нульову різницю ходу у точці O , так як лінза ніяк не буде впливати на її розповсюдження (рис.2.7,а, S_1 та S_2 - два уявні джерела випромінювання, якими можна замінити два розділені промені на виході з інтерферометра).

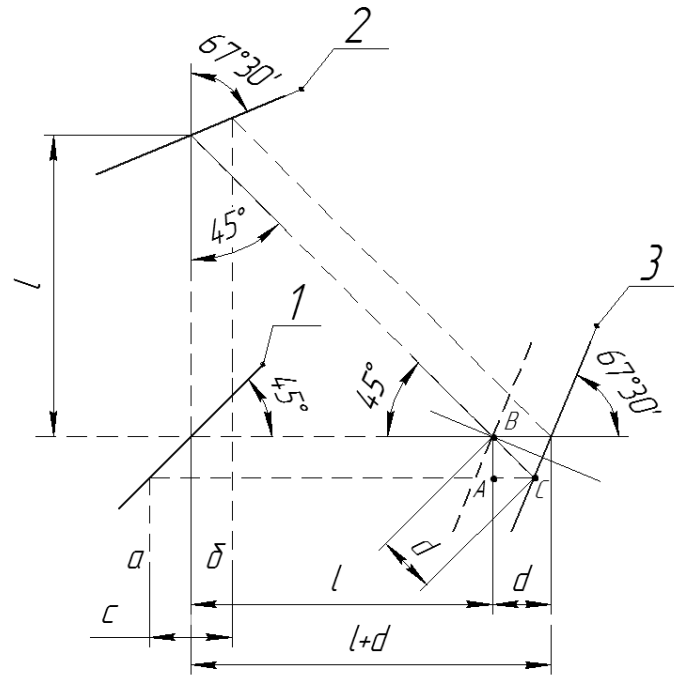


Рис. 2.6. Схема інтерферометра Сан'яка

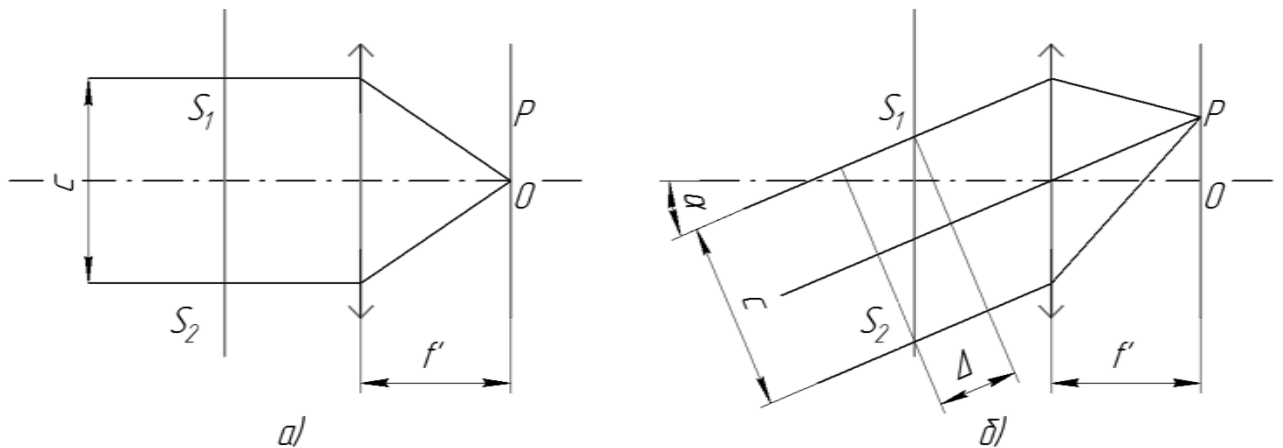


Рис. 2.7. Оптична різниця ходу

Плоска хвиля, що нахилена під кутом α до оптичної осі (рис. 2.7 б) буде мати оптичну різницю ходу (Δ), яка розраховується за формулою:

$$\Delta = \sin \alpha \cdot c \approx \operatorname{tg} \alpha \cdot c = \frac{PO}{f'} \cdot c = \frac{x}{f'} \cdot c, \quad (2.1)$$

де $PO = x$ – величина зміщення хвилі у фокальній площині від оптичної осі, f' – фокусна відстань вихідної оптики.

Для матричного приймача величину зміщення від оптичної осі можна записати як:

$$x = (i - i_0) \cdot a,$$

де i_0 – номер пікселя, для якого різниця ходу дорівнює нулю, i – номери пікселей, для яких різниця ходу не дорівнює нулю, a – розмір пікселя.

Формулу для розрахунку різниці ходу (1) можна переписати:

$$\Delta = (i - i_0) \frac{a \cdot c}{f'} = (i - i_0) \frac{a \cdot \sqrt{2} \cdot d}{f'},$$

де d – величина зміщення одного з дзеркал.

Розглянемо формування інтерференційної картини на матричному приймачі випромінювання. Результуюча інтенсивність інтерференційної картини в загальному випадку для монохроматичного випромінювання розраховується по формулі [65]:

$$I_p = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(k\Delta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\right) \quad (2.2)$$

де I_1 та I_2 – інтенсивності двох уявних джерел випромінювання, що створюються інтерферометром, k – хвильове число, λ – довжина хвилі.

Вважаємо, що світлоділильна пластинка ділить вхідне випромінювання на дві рівні частини (I_0) і на дзеркалах нема втрат, тобто $I_1 = I_2 = I_0$. Підставивши (2.1) у (2.2), отримуємо вираз для визначення інтенсивності інтерференційної картини $I(x)$ на приймачі випромінювання в напрямку зміни різниці ходу:

$$\begin{aligned} I(x) &= 2I_0 + 2I_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\right) = 2I_0[1 + \cos(2\pi\sigma\Delta)] = \\ &= 2I_0 \left[1 + \cos\left(2\pi\sigma \frac{x}{f'} \cdot c\right) \right], \end{aligned}$$

де $\sigma = 1 / \lambda$.

У випадку не монохроматичного випромінювання, з урахуванням поглинання у атмосфері, інтенсивність інтерференційної картини на

приймачі випромінювання ($I(x, y)$) буде сумою інтенсивностей всіх монохроматичних складових [13,66]:

$$I(x, y) = \int_0^{\infty} 2L(\sigma, x, y)k(\sigma) \left(1 + \cos \left(2\pi\sigma \frac{x}{f'} \cdot c \right) \right) d\sigma,$$

де $L(\sigma, x, y)$ – розподіл спектральної яскравості у площині об'єкта, $k(\sigma)$ – спектральний коефіцієнт ослаблення випромінювання у атмосфері.

2.4. Формування сигналу приймачем випромінювання

На третьому етапі роботи ЗФС, матричний приймач випромінювання формує вихідний сигнал $S(i, j)$. Його можна розрахувати за формулою [66]:

$$S(i, j) = \int_0^{\infty} I(x, y) \text{rect} \left(\frac{x}{c} - i, \frac{y}{c} - j \right) dx dy,$$

де i, j – номер рядка та стовпця пікселя відповідно, $\text{rect} \left(\frac{x}{c} - i, \frac{y}{c} - j \right)$ – функція, що описує просторове розміщення пікселів.

2.5. Обробка сигналу та відновлення спектральної характеристики

Останній етап роботи ЗФС – відновлення спектральної характеристики поверхні Землі ($I(\sigma)$) використовуючи зворотне Фур'є перетворення до зареєстрованої інтерферограми. Для цього можна використати основне рівняння Фур'є-спектроскопії, яке можна записати у вигляді:

$$I(\sigma) = \int_0^{\infty} \left[I(\Delta_{\max}) - \frac{1}{2} I(0) \right] \cos(2\pi\sigma\Delta) d\Delta,$$

де $I(\Delta_{\max}), I(0)$ – інтенсивність інтерференційної картини на приймачі випромінювання при максимальній (Δ_{\max}) та мінімальній (0) різниці ходу променів, що інтерферують.

2.6. Вплив на якість зображення деформації робочих поверхонь компонентів оптичної схеми зображуючого Фур'є-спектрометра

На рис. 2.8. наведено оптичну схему комбінованого ЗФС, яка створена у програмі ZEMAX. Принцип роботи даної схеми розглядався у п. 1.3.4.

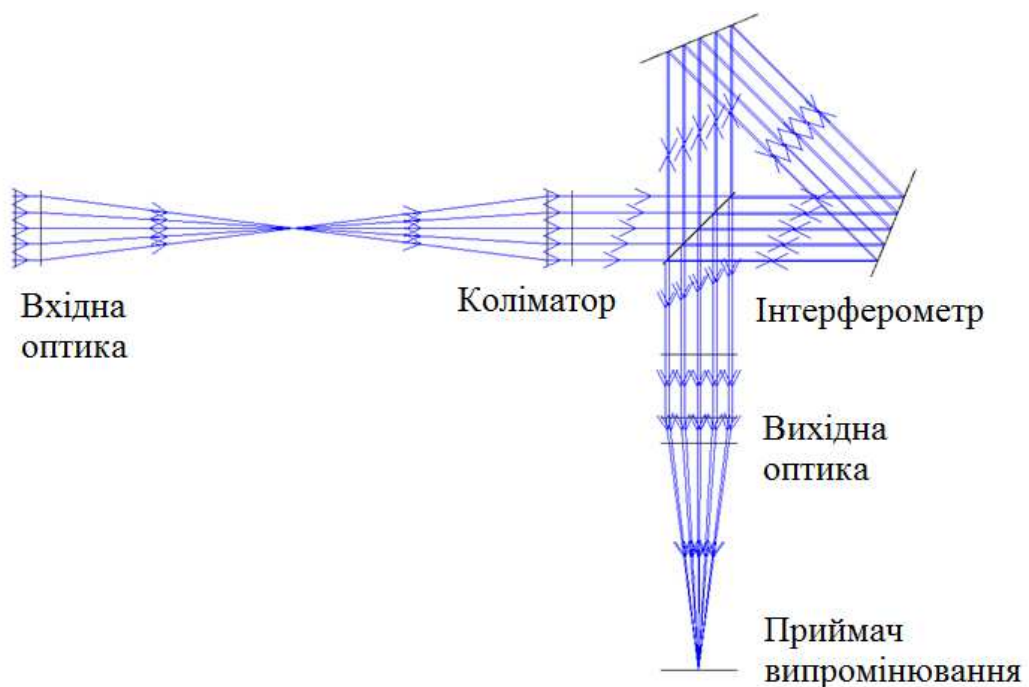


Рис. 2.8. Оптична схема комбінованого ЗФС

За результатами аналізу ідеальної схеми та схеми зі зміщеними, нахиленими чи деформованими компонентами, фокусуюча оптика вносить набагато більше спотворень у зображення, ніж дзеркальна. При зміні фокусної відстані коліматора, вхідної та вихідної оптики відбувається падіння МПФ системи. На рис. 2.9 приведений графік падіння МПФ від зміни фокусної відстані вхідної оптики на частоті Найквіста. Зміна фокусної відстані коліматора та вихідної оптики призводить до таких же змін МПФ.

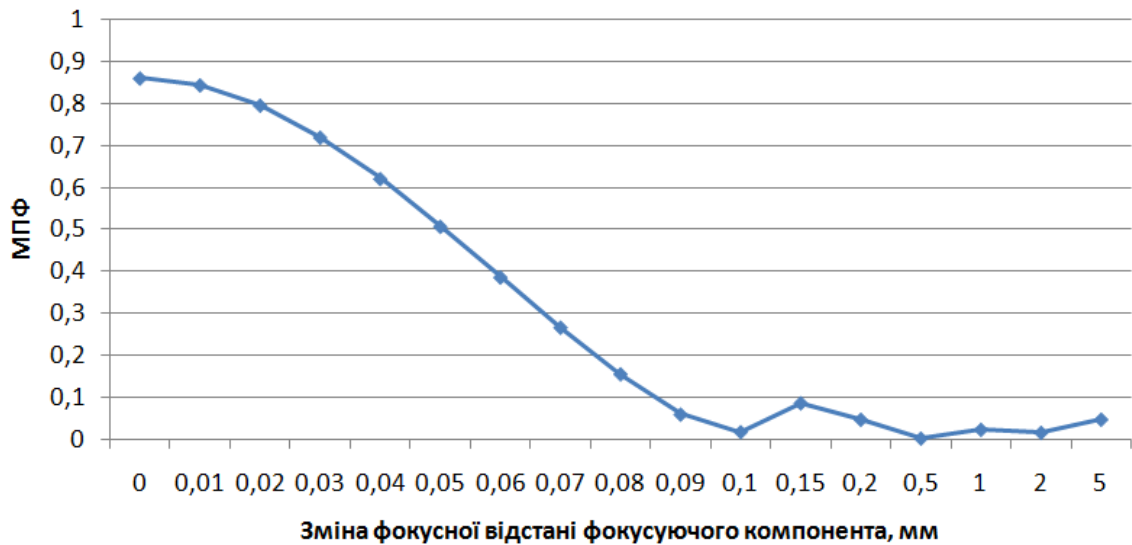


Рис.2.9. Зміна фокусної відстані компонентів

З іншого боку, зміщення дзеркал інтерферометра на 0,5 мм або їх нахил у 1° зменшують МПФ лише на 10%, тобто впливають набагато менше, ніж фокусуюча оптика. Зображення на матриці при цьому може зміщуватися, що майже не впливає на якість зображення.

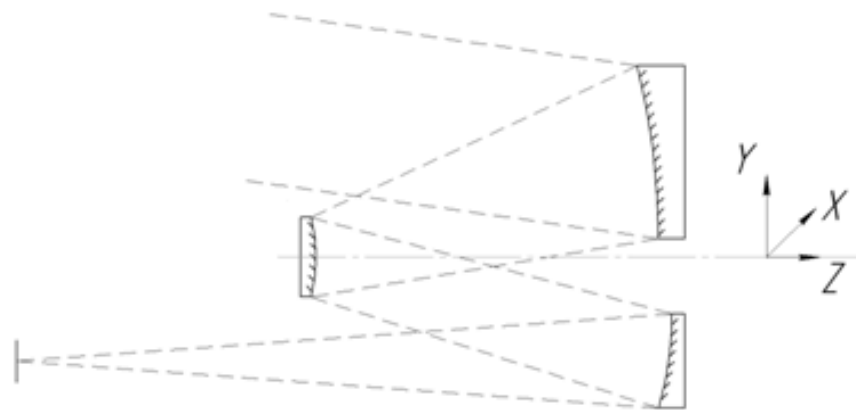


Рис. 2.10. Вхідна оптика

При використанні в якості входної оптики складної системи, наприклад рис. 2.10, нахили, деформації та зміщення елементів входної оптики ще більше впливають на якість зображення. Наприклад, поворот будь-якого з компонентів схеми на 1° призводить до падіння МПФ на 45 %, зміна радіусу 2-го компоненту на 0,1 мм - на 55%, зміщення другого компоненту на 0,1 мм

- на 80%. Однак зміщення дзеркал інтерферометра не призводять до такого ефекту.

Нахили та переміщення компонентів оптичної схеми можливо компенсувати за допомогою юстування, параметри оптичних поверхонь (наприклад, радіус) можливо контролювати при виготовленні. Однак деформації оптичних поверхонь, що виникають при контролі та використанні системи під дією зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), все одно будуть впливати на оптичні параметри компонента та погіршувати якість зображення, що створюється нею. Тому необхідно прогнозувати такі деформації та зменшувати їх оптимізуючи конструкцію оптичних елементів.

2.7. Опис деформації дзеркальних поверхонь поліномами Церніке

Під дією різних факторів (сили тяжіння, інших сил, температурних деформацій, вібрацій, ударів) на корпус приладу та на його оптичні компоненти, дзеркальні поверхні вхідної оптики деформуються. Ця деформація може призвести до значного погіршення зображення, що створюється вхідною оптикою у площині вхідної діафрагми, і як наслідок, отримання неякісного знімку всією системою.

Як приклад, можна привести деформацію дзеркала під дією сили тяжіння у земних умовах при виготовленні. Така деформація має бути мінімальною або розрахованою для віднімання від значень, що отримані при контролі. В іншому випадку (якщо така деформація не врахована) дзеркало у робочому положенні на орбіті в умовах невагомості "розправляється", в результаті чого його профіль не відповідає необхідному теоретично розрахованому. Це призводить до погіршення якості зображення.

Отже, необхідно створити математичну модель опису деформації дзеркальної поверхні під дією зовнішніх факторів. Деформація дзеркала буде

визначатися по середньоквадратичному відхиленню робочої поверхні дзеркала (RMS), яке розраховується по коефіцієнтам Церніке.

Математична модель для визначення деформації наступний [67, 68]:

1. Дзеркальна поверхня розбивається на велику кількість точок (сітку) (рис.2.11).
2. Деформація дзеркала під дією зовнішніх факторів розраховується методом кінцевих елементів [69]. В результаті отримуємо значення зміщення кожного елемента сітки по трьом координатам.
3. Деформацію дзеркальної поверхні відновлюємо апроксимацією по методу найменших квадратів (МНК). Для апроксимації використовуємо поліноми Церніке [70], які у полярних координатах можуть бути представлені у вигляді:

$$W(\rho, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n [R_n^m(\rho)(C_{nm}\cos(m\varphi) + S_{nm}\sin(m\varphi))],$$

де R_n^m - коефіцієнт поліному C_{nm} , S_{nm} - косинусний та синусний коефіцієнти розкладу. Якщо деформація симетрична відносно оптичної осі, то

$$W(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m C_{nm} R_n^m(\rho) \cos(m\varphi) = C_{00} + C_{20} R_2^0(\rho) + \\ + C_{11} R_1^1(\rho) \cos(\varphi) + C_{40} R_4^0(\rho) + C_{31} R_3^1(\rho) \cos(\varphi) + \dots$$

Далі ми застосовуємо поліноми Церніке у декартових координатах, які описані у [71].

4. Систему МНК вирішуємо методом Гауса та знаходимо значення косинусних та синусних коефіцієнтів розкладу.
5. Середньоквадратичне відхилення робочої поверхні дзеркала (RMS) розраховується по визначеним коефіцієнтам розкладу за формулою:

$$W_{RMS}^2 = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{C_{n0}^2}{n+1} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^N \frac{1}{n+1} (C_{nm}^2 + S_{nm}^2) \quad (2.3)$$

або за формулою:

$$W_{RMS}^2 = \sqrt{\overline{W^2} - (\overline{W})^2}, \quad (2.4)$$

де W - поліном Церніке.

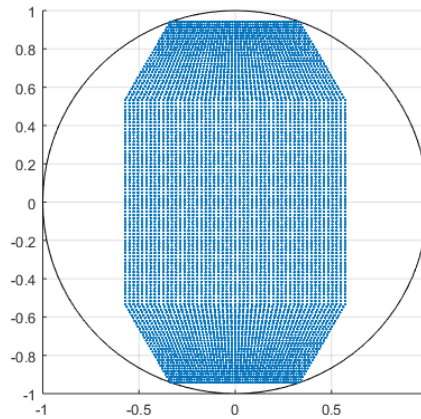


Рис 2.11. Дзеркальна поверхня, розбита на сітку, у одиничному колі

Алгоритм запропонованої математичної моделі приведений у Додатку Б, програма для визначення деформації на базі запропонованої математичної моделі, що написана у програмному пакеті MatLab, приведена у Додатку В.

Аналіз показав, що при визначенні деформації за формулами (2.3) та (2.4) отримуємо майже однаковий результат, різниця складає менше 3%.

Оскільки при деформації поверхні можливе переміщення та нахил самої поверхні, для оцінки лише пластичної деформації перед розрахунком за формулами (2.3) та (2.4) необхідно прибрати перші чотири коефіцієнти: C_0^0 (постійна складова), C_1^1 (нахил у напрямку x), C_1^{-1} (нахил у напрямку y) та C_2^0 (переміщення вздовж z (оптичної вісі)). На рис. 2.12.*a* приведена відновлена деформація поверхні з використанням усіх коефіцієнтів Церніке, на рис 2.12.*б* - перші чотири коефіцієнти виключені з розрахунку.

Коефіцієнти Церніке визначаються у одиничному колі (рис.2.11), тому при визначенні деформацій не осесиметричних дзеркал (позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал) можуть виникати похибки.

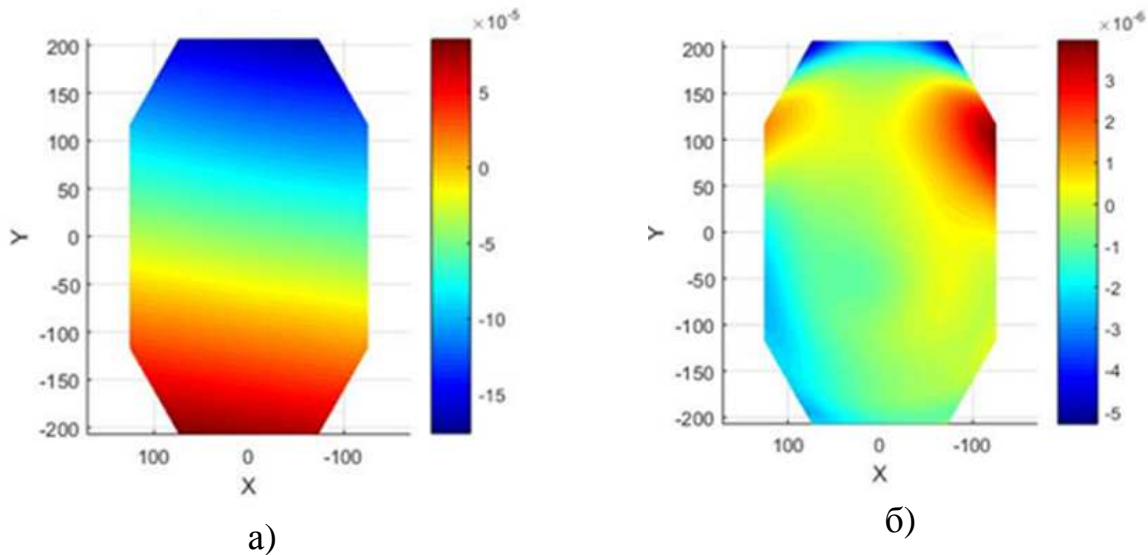


Рис.2.12. Всі коефіцієнти Церніке (а), без перших чотирьох коефіцієнтів Церніке (б)

Як показали дослідження, чим вужче дзеркало (чим більше воно не схоже на коло), тим більша похибка, однак вона досить мала при розрахунку дзеркал з відношенням меншої сторони до більшої більше 0,4. При відношенні менше 0,4 метод застосовувати не можна, так як похибка набагато збільшується та починає впливати на результати розрахунку. На рис.2.13. представлено розрахунок дзеркал при двох різних варіантах кріплення (а та б) та проілюстровано похибки, що виникають під час розрахунку вузьких дзеркал (500x200 та 500x150).

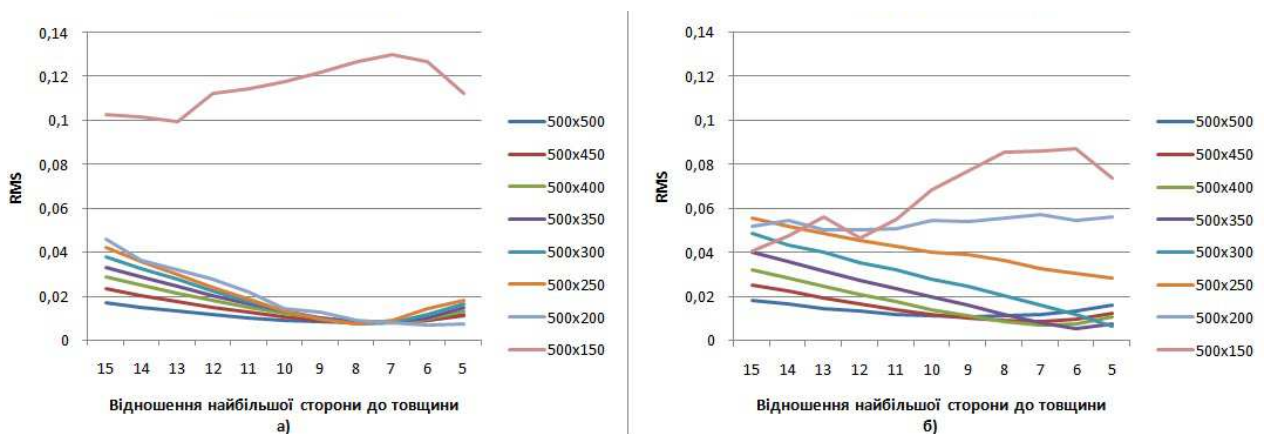


Рис. 2.13. Похибки, що виникають при розрахунках вузьких дзеркал

Тому для точного визначення деформації коефіцієнти Церніке необхідно розраховувати чисельно по значенню у кожній точці, що і було зроблено у створеному програмному пакеті "Deform".

Для розрахунку круглих оптичних поверхонь обмежень нема.

2.8. Методика проведення дослідження впливу умов зовнішнього середовища на входну оптику зображуючого Фур'є-спектрометра

У процесі роботи було сформовано методику проведення комплексного дослідження впливу умов зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень) на оптичні елементи входної оптики (з механічними деталями корпусу та без них) з обробкою та передачею результатів моделювання у програми для оптичного аналізу за допомогою розробленого спеціалізованого алгоритму (рис.2.14). Сформована методика використовує запропоновану математичну модель визначення деформацій. Розроблену методику можливо використовувати для визначення деформацій будь-яких оптичних поверхонь та елементів під дією будь-яких зовнішніх впливів.

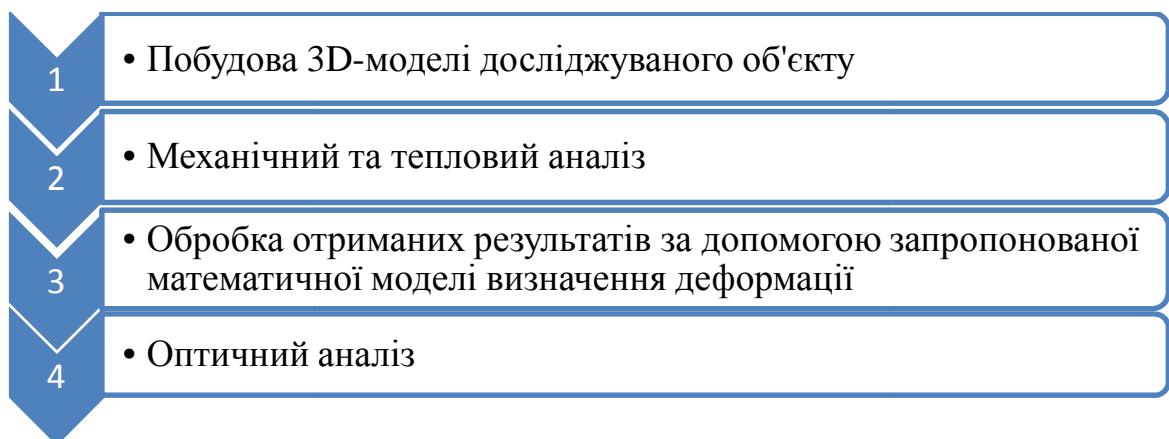


Рис. 2.14. Складові частини розробленої методики проведення дослідження впливу зовнішніх факторів

Розглянемо більш детально кожний з етапів методики дослідження моделювання.

1. Побудова 3D-моделі досліджуваного об'єкту

У CAD-програмі (наприклад, SOLIDWorks, ANSYS DesignModeler) будується 3D-модель досліджуваної деталі. На рис. 2.15 показані приклади різних 3D-моделей. Модель, для подальшого розрахунку, розбивається на сітку.

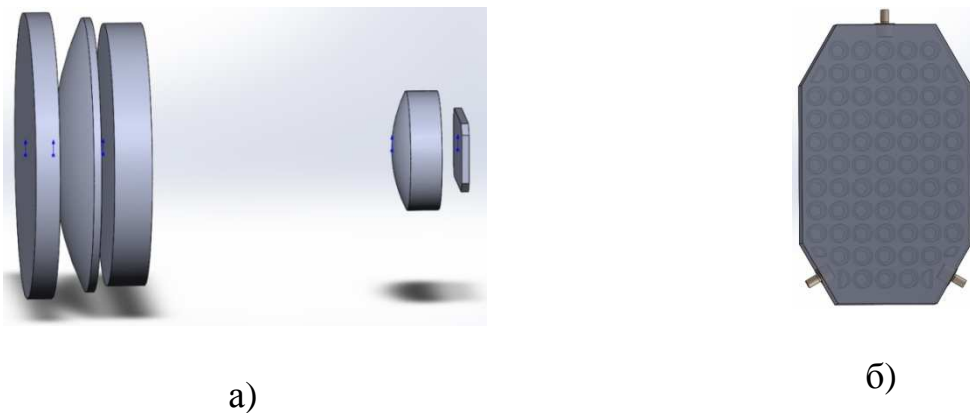


Рис. 2.15. 3D-модель лінзового об'єктива (а) та позаосьового сегмента осесиметричного дзеркала з полегшенням (б)

2. Механічний та тепловий аналіз

Механічний та тепловий аналізи проводяться у програмі ANSYS Workbench. Дана програма дозволяє моделювати будь-які механічні впливи, такі як сила тяжіння, удари, вібрації та натяг при кріпленні оптичної деталі, а також досліджувати температурний вплив з розрахунком розподілу температур у моделі та подальшим розрахунком деформацій. На рис. 2.16 та рис. 2.17. наведені приклади деяких результатів, отриманих при моделюванні.

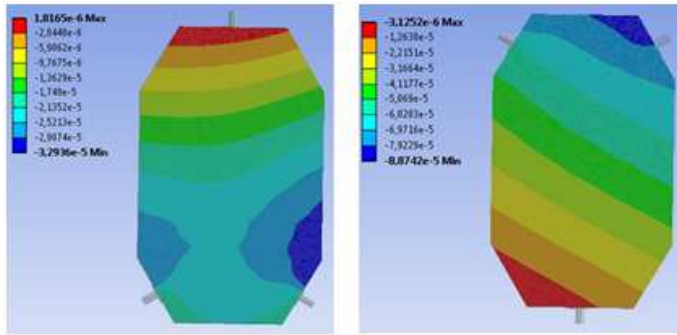


Рис. 2.16. Позаосьовий сегмент осесиметричного дзеркала під дією сили тяжіння при двох варіантах кріплення: 2 опори знизу та 2 опори зверху. Сила тяжіння діє в площині рисунка вниз

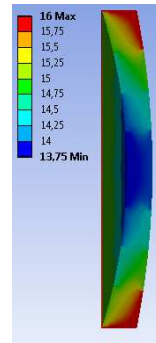


Рис. 2.17. Лінза з градієнтом температур

Після проведення необхідного виду аналізу спеціально розроблений макрос для програми ANSYS виконує збереження всіх необхідних даних у спеціальному форматі для подальшої їх обробки та аналізу.

3. Обробка отриманих результатів за допомогою запропонованої математичної моделі визначення деформації

Отримані в результаті механічного та теплового аналізу деформації поверхні представляють собою лінійні переміщення вузлів сітки, згенерованої при моделюванні. Основний критерій, який використовується для визначення деформації робочої поверхні дзеркал є середньоквадратичне відхилення їх робочої поверхні (RMS), що визначається в довжинах хвиль (стандартною довжиною хвилі обрано $\lambda=630$ нм). RMS визначається по коефіцієнтам Церніке (Zernike Fringe Sag). Розрахунок коефіцієнтів Церніке відбувається в два етапи. На першому етапі визначається поверхня (сферична або асферична 2-го порядку), яка є найбільш наближеною до деформованої. Знайдена поверхня може бути нахилена або зміщена відносно номінальної, тобто початкової поверхні без деформацій. Розроблений алгоритм розраховує ці нахили та зміщення. На практиці вони можуть бути усунені за рахунок

юстування, а при моделюванні їх можливо усунути програмним шляхом. На другому етапі відхилення від наближеної поверхні апроксимуються поліномами Церніке. Така методика розрахунку дозволяє оцінювати тільки пластичні деформації поверхні оптичного елементу. В результаті отримуємо відновлений рисунок деформованої поверхні з використанням всіх поліномів Церніке (рис. 2.12 *а*) та без перших чотирьох поліномів (тільки пластичні деформації, рис. 2.12 *б*).

При використанні коефіцієнтів Церніке при розрахунку RMS можуть виникнути похибки через те, що коефіцієнти визначаються у одиничному колі (рис.2.11). Чим вужче дзеркало (чим більше воно не схоже на коло), тим більша похибка, однак вона досить мала при розрахунку дзеркал з відношенням меншої сторони до більшої більше 0,4. При відношенні менше 0,4 метод застосовувати не можна, так як похибка набагато збільшується та починає впливати на результати розрахунку. Для розрахунку круглих оптичних поверхонь обмежень нема.

Розроблену математичну модель (розділ 2.7) було відлагоджено та перевірено в програмному середовищі MATLAB (Додаток В), після чого він був реалізований в прикладному програмному забезпеченні «Deform», де апроксимація поліномами Церніке відбувається у числовому вигляді [73].

4. Оптичний аналіз

Розроблене програмне забезпечення експортує всі дані розрахунку у спеціальному вигляді (коефіцієнти Церніке) у програму для оптичного аналізу ZEMAX для подальшого визначення зміни якості зображення від зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що діють на досліджувані оптичні компоненти.

2.9. Висновки до розділу 2

1. Запропоновано новий метод проектування ЗФС статичного та комбінованого типів на базі інтерферометра Сан`яка на основі розділення його роботи на чотири етапи: формування зображення вхідною оптикою у площині вхідної щілини, формування інтерференційної картини на приймачі випромінювання, формування сигналу приймачем випромінювання, обробка сигналу та відновлення спектральної характеристики. Така послідовність дозволяє визначити всі основні параметри та характеристики ЗФС, а також прискорити та спростити процес створення та оптимізації базової моделі ЗФС;
2. Дослідження удосконаленої математичної моделі ЗФС показало, що вхідна оптика, при зміщенні, нахилах або деформаціям компонентів вносить набагато більше спотворень у створюване системою зображення.
3. Розроблено математичну модель для визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією факторів зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), що відрізняється від відомих можливістю визначення деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів. Використання такої математичної моделі допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій. Розроблену математичну модель було відлагоджено та перевірено в програмному середовищі MATLAB, після чого він був реалізований в прикладному програмному забезпеченні «Deform».
4. Розроблено методику проведення дослідження впливу зовнішнього середовища (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень) на деформацію робочих поверхонь оптичних елементів. Розроблена

методика дозволяє проводити практично повний цикл моделювання оптичних елементів. Її можливо використовувати для визначення деформацій будь-яких оптичних поверхонь та елементів під дією будь-яких зовнішніх впливів. Така технологія дозволяє скоротити витрати на натурне моделювання всіх процесів, що діють на оптику та призводять до її деформації та на визначення самих деформацій.

РОЗДІЛ 3: ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ ДЗЕРКАЛ ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОЛЕГШЕННЯ ТА КРІПЛЕННЯ

3.1. Вихідні положення

Дзеркальна вхідна оптика є однією з найважливіших частин ЗФС. Від неї залежать такі параметри, як роздільна здатність, смуга огляду, модуляційно-передавальна функція всієї системи. Розробники прагнуть збільшити всі ці параметри, але при цьому зростає і вага та деформація робочих поверхонь дзеркал, що набагато ускладнює систему кріплення та збільшує вартість виводу приладу на орбіту.

Для отримання сканером ДЗЗ високої просторової роздільної здатності (менше 1 м) необхідно, щоб сканер мав велику фокусну відстань (більше 5000 мм) та велику вхідну зіницю (500 – 800 мм). Для отримання таких характеристик необхідно, щоб розміри дзеркала об'єктива були великими (все дзеркало, з якого виготовляється сегмент, повинно мати діаметр більше 0,5 м). При цьому розміри та вага об'єктива будуть великими. На рис. 3.1 приведено залежність ваги дзеркала при використанні квадратного (а) та прямокутного (б) сегментів осесиметричних дзеркал від їх розмірів та товщини.

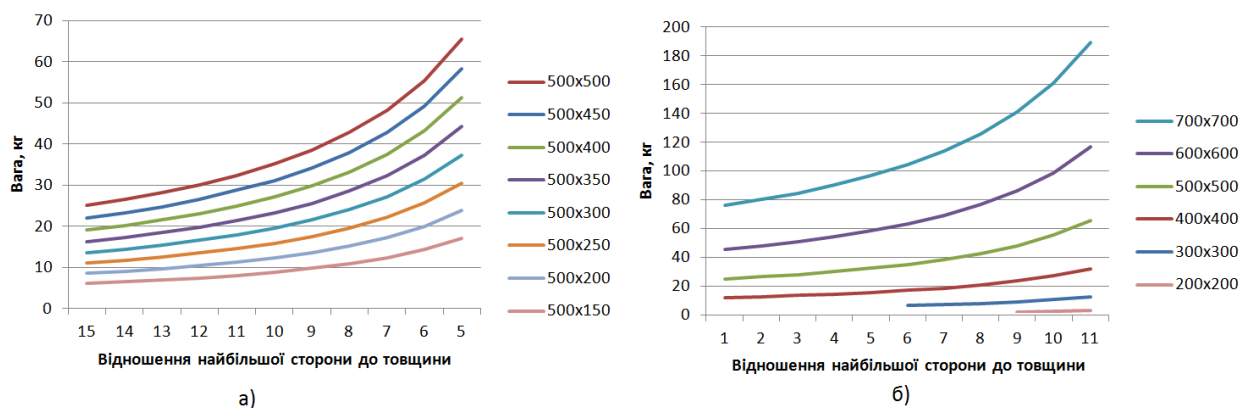


Рис. 3.1. Залежність ваги дзеркал від їх габаритних розмірів для: а) квадратного дзеркала, б) прямокутного дзеркала

Вага одного дзеркала може бути 20 кг і більше, що набагато ускладнює механічну частину системи та збільшує вартість виводу всієї оптичної системи на орбіту. Тому питання полегшення є дуже актуальним при розробці оптичних систем вхідної оптики будь-яких сканерів ДЗЗ [68].

Всі дзеркальні об'єктиви можна розділити на три типи: центровані, умовно-децентровані та децентровані [72]. У центрованих та умовно-децентрованих об'єктивах центри всіх оптичних елементів розміщені на одній осі, однак у умовно-децентрованих системах вхідна зіниця децентрована або оптична система працює позаосьовим полем. У децентрованих об'єктивах центри обертання оптичних поверхонь не лежать на одній осі (до цих систем відносяться також центровані системи, у яких елементи нахилені або децентровані на невелику величину для отримання кращої якості зображення).

Для вхідної оптики систем ДЗЗ, що працюють у режимі pushbroom, найкращим варіантом є умовно-децентровані дзеркальні системи, так як у них повністю відсутнє центральне екранування, що значно знижує модуляційну передавальну функцію на середніх частотах. У таких об'єктивах часто використовуються позаосьові сегменти дзеркал.

Задача полегшення дзеркал – це зменшення маси дзеркал за рахунок конструктивних вибірок при забезпеченні достатньої жорсткості та міцності, що необхідна при виготовленні, проведенні контрольних операцій та при виведенні системи на орбіту. Задача моделювання полегшення - розробити таку його структуру, що буде задовольняти наступними вимогам:

1. у земних умовах (під дією сили тяжіння) при виготовленні та виконанні контрольних операцій деформація робочої поверхні дзеркала не повинна перевищувати допустимі значення;
2. деформація робочої поверхні дзеркала під впливом градієнта температур не повинна перевищувати допустимі значення;

3. дзеркало повинно витримувати всі навантаження при транспортуванні, старті ракетоносія та виведенні супутника на орбіту;
4. вага дзеркала повинна бути мінімальною.

Допустимі значення деформації робочих поверхонь дзеркал визначаються в ході дослідження оптичної системи.

Далі розглянемо можливості полегшення позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал та осесиметричних дзеркал, однак спершу необхідно визначити алгоритм проведення дослідження впливу параметрів полегшення на деформацію робочих поверхонь дзеркал.

3.2. Алгоритм проведення дослідження впливу параметрів полегшення на деформацію робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики

В процесі роботи був визначений алгоритм проведення дослідження впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, а також їх типів, на деформацію робочих поверхонь дзеркал (рис.3.2). Всі результати, що приведені далі, були отриманні в результаті дослідження згідно з визначеним алгоритмом. В якості зовнішніх факторів обрано силу тяжіння.

Опис алгоритму:

1. Створення параметричної 3-D моделі виходячи з характеристик дзеркала по оптичній схемі – задається тип дзеркала, його габаритні розміри, радіус сферичної поверхні. Також здійснюється вибір матеріалу дзеркала.
2. Попередній вибір кріплення: здійснюється без використання механічних деталей – дзеркало закріплюється за свої грані або лиски.
3. Дослідження впливу габаритних розмірів дзеркала (товщини, висоти, ширини або діаметра, діаметру центрального отвору) при різних обраних типах кріплення. Результатом дослідження є остаточний вибір всіх габаритних розмірів.



Рис.3.2. Алгоритм для дослідження впливу полегшення та кріплення на деформацію дзеркала

4. Вибір типів полегшення (різних форм вирізів) для дослідження можливостей зменшення ваги.

5. Дослідження можливостей зменшення ваги при використанні різних варіантів полегшення (розділ 1,5). Результатом дослідження є вибір варіанту полегшення та типу отворів у задній стінці дзеркала, що дозволяє максимально зменшити деформацію робочої поверхні та вагу. Подальше дослідження проводиться стосовно обраного варіанту.

6. Після визначення варіанту полегшення необхідно вибрати варіант механічного кріплення, яке буде застосовуватися. Після вибору створюється параметрична модель кріплення, яка додається до моделі дзеркала. Якщо модель кріплення розроблена раніше, можливо починати дослідження вже з ним.

7. Модель дзеркало-кріплення досліджується наступним чином - всі параметри змінюються незалежно один від одного. Встановлюється вплив кожного з них на деформацію дзеркала.

8. Згідно з результатами, отриманими на попередньому кроці, вибираються такі геометричні параметри, що мінімізують деформацію та вагу.

3.3. Матеріал дзеркал вхідної оптики

Важливим етапом на початку проектування дзеркал вхідної оптики є вибір матеріалу. Обраний матеріал повинен мати високу міцність, мати низьку густину та мати малий коефіцієнт лінійного розширення (КЛР). У таблиці 3.1 [35, 74] приведені фізико-механічні параметри деяких класичних матеріалів, які можуть бути використані для виготовлення дзеркал вхідної оптики.

Аналіз літератури показав, що у багатьох випадках використовується Церодур, так як технологія його обробки досить проста та добре розроблена. Тому для подальших досліджень було обрано саме Церодур, параметри та характеристики якого наведено на офіційному веб-сайті виробника [75]. Для всіх інших матеріалів форма графіків, що буде приведена, не змінюється, однак вони зміщуються по осі Y в залежності від своїх механічних параметрів [76]. Для прикладу, на рис.3.3. наведені залежності деформації робочої поверхні дзеркала від його товщини для трьох різних матеріалів.

Таблиця 3.1.

Фізико-механічні параметри матеріалів

Матеріал	Характеристика				
	Модуль пружності E, МПа	Модуль зсуву, G, МПа	Межа міцності, σ_B , МПа	Густина, ρ , кг/м ³	КЛР, αK^{-1}
Ситал СО-115М	93900	38000	78,4	2460	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Церодур	90300	36300	70	2530	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Карбід кремнію	$3,94 \cdot 10^5$	$1,64 \cdot 10^5$	465	3220	$2,5 \cdot 10^{-7}$
Берилій	$3,1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	316	1860	$11,2 \cdot 10^{-6}$
Алюміній	68000			2700	$22,5 \cdot 10^{-6}$

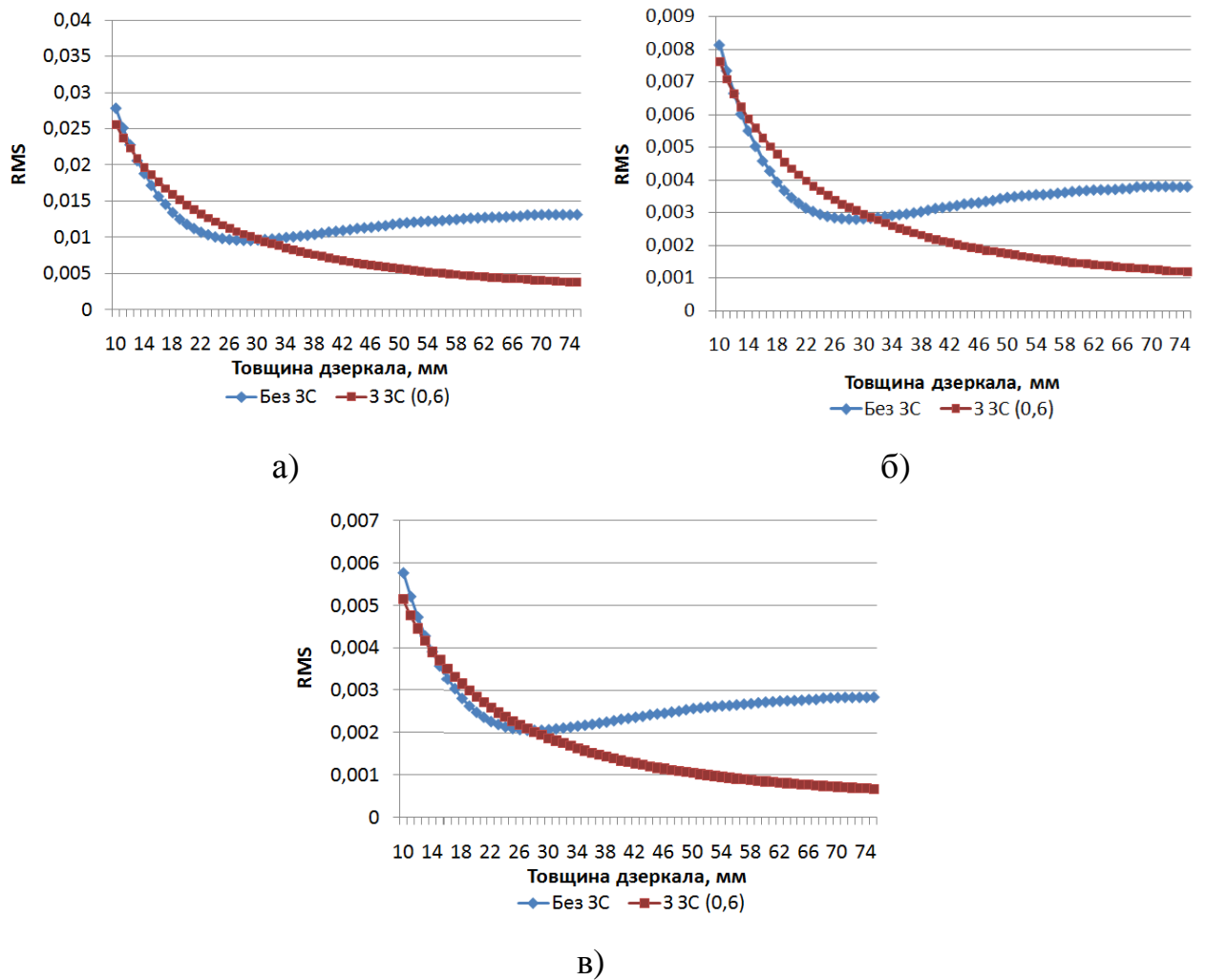


Рис.3.3. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від його товщини для різних матеріалів дзеркала: а) склокераміка фірми Церодур, б) карбід кремнію, в) берилій.

З графіків, приведених на рис 3.3. видно, що форма залежностей майже не змінюється, однак вони зміщуються по осі Y. Для прикладу наведемо мінімальне значення деформації робочої поверхні дзеркала від його товщини при використанні полегшення без ЗС: Церодур – $0,01\lambda$, карбід кремнію – $0,0028\lambda$, берилій – $0,002\lambda$.

3.4. Кріплення дзеркал вхідної оптики

На сьогоднішній день в основному застосовуються наступні типи кріплення дзеркал вхідної оптики:

1. кріплення за циліндричну поверхню (за лиски для осесиметричних дзеркал) або за фаски (для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал);
2. кріплення за задньою стінку.

Розглянемо ці типи кріплення більш детально.

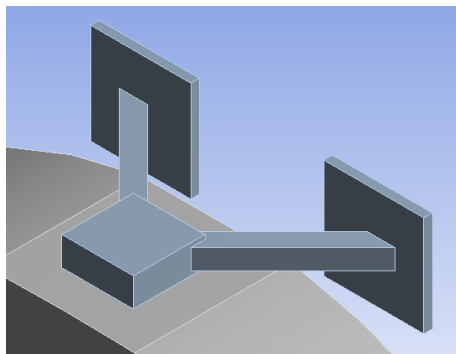
3.4.1. Кріплення за лиски або фаски

Дане кріплення найбільш розповсюджене. Найбільш часто для кріплення використовують біподи, які показані на рис.3.4 [41, 77]. Вони можуть бути 3-х типів: біпод-пластина (а), гнучкий біпод по одній (б) та по двом (в) площинам.

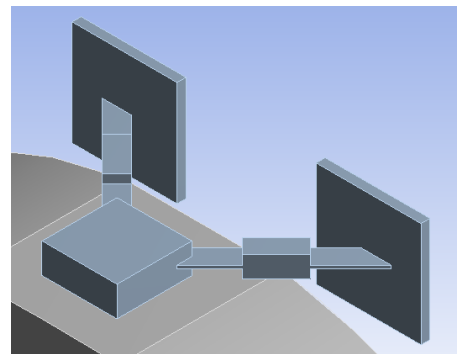
Біпод-пластину застосовують для кріплення відносно малих осесиметричних дзеркал [78]. Гнучкі біподи застосовують для зменшення деформації за рахунок температурного градієнта (варіант б), та для зменшення деформацій за рахунок навантажень у напрямку оптичної осі (варіант в) [40].

Менш розповсюджене кріплення на шарнірах та втулках, яке показане на рис.3.5 [45, 79, 80]. Кожне дзеркало має 3 отвори, вісі яких знаходяться в одній площині і перетинаються в спільній точці в межах площини дзеркала. У кожний отвір вклеюється втулка. У кожній втулці знаходиться шарнір, який далі закріплений на оправу дзеркала. Кожний окремий шарнір може вільно рухатися у втулці, однак при комбінації з 3-х шарнірів дзеркало буде закріплено у потрібному положенні. Таке кріплення не тільки забезпечує

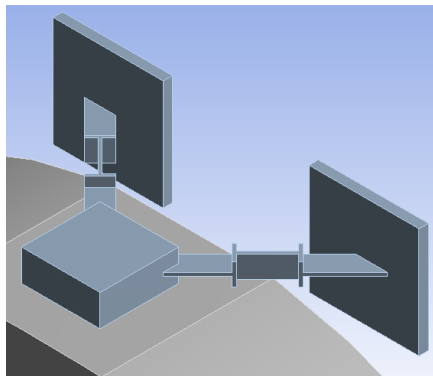
температурну розв'язку та не створює додаткових деформацій, а ще дозволяє забезпечити простий механізм юстування кожного дзеркала у об'єктиві.



а)



б)



в)

Рис.3.4. Біподи: а) біпод-пластина, б) гнучкий біпод по одній площині, в) гнучкий біпод по двом площинам

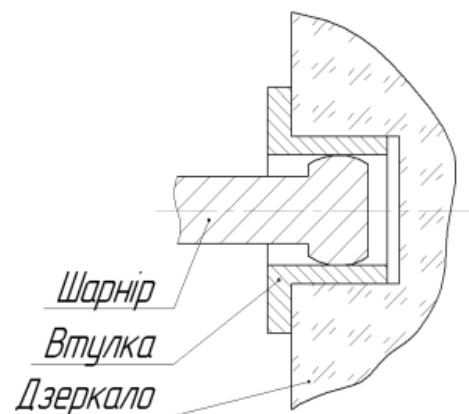


Рис.3.5. Кріплення дзеркал на шарнірах та втулках

Ще одним типом кріплення може бути кріплення за три виступаючі частини дзеркала, яке представлено у [81].

Дослідження показало, що для отримання найменшої деформації робочої поверхні дзеркала, площина, в якій діє кріплення, має проходити через центр ваги дзеркала. Дане твердження справедливе для будь-якого типу

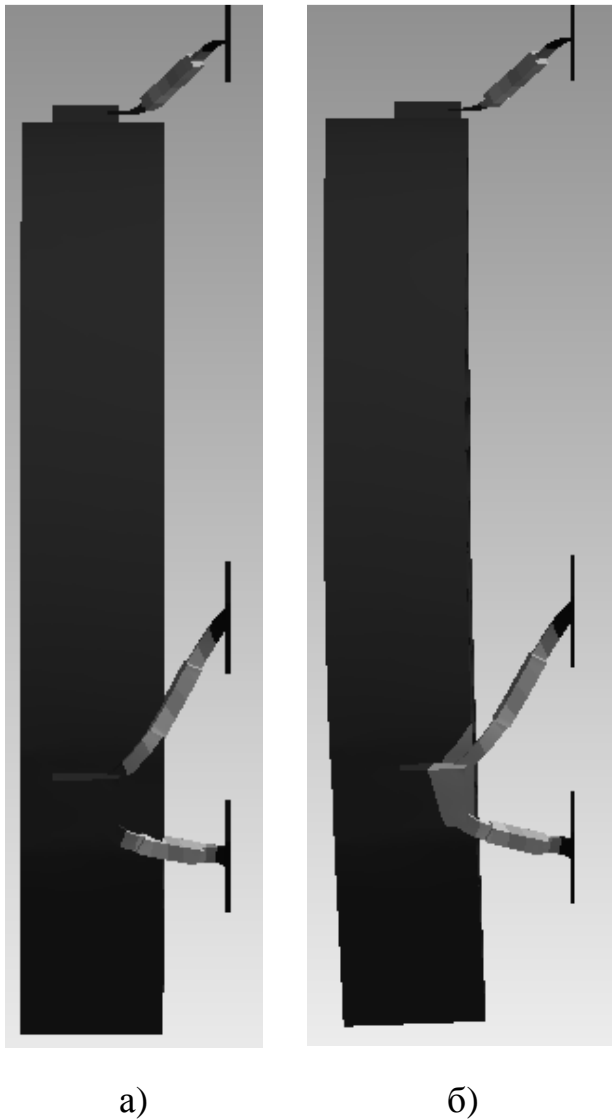


Рис. 3.6. Вибір оптимального положення кріплення: а) оптимальне положення, б) не оптимальне положення

такого кріплення. Мінімум деформації при оптимальному положенні кріплення спостерігається при використанні будь-яких отворів полегшення. У випадку симетричного дзеркала відносно оптичної осі, ця площина має бути паралельна задній грані.

На рис. 3.6 показане дзеркало з кріпленням на біподах, які за основу "ніжок" закріплені нерухомо. Сила тяжіння діє у площині рисунка вниз. На рис. 3.6 а кріплення займає оптимальне положення – дзеркало змістилося на кріпленні вниз без суттєвої деформації робочої поверхні. На рис. 3.6 б кріплення зміщене вправо відносно оптимального положення – дзеркало не тільки змістилося вниз, а ще й значно деформувалося.

Для даного виду кріплення тільки 2 параметри суттєво змінюють деформацію робочої поверхні дзеркала: це положення кріплення (відстань від задньої грані до точки дії кріплення) та

кут між "ніжками" (так як змінюючи кут змінюється положення точки дії кріплення на лисці). Це проілюстровано на рис. 3.7 та 3.8, де наведені деякі розміри, які змінювалися під час моделювання, та значення деформації робочої поверхні при їх зміні. Як видно з графіків, лише кут між "ніжками" суттєво впливає на деформацію.

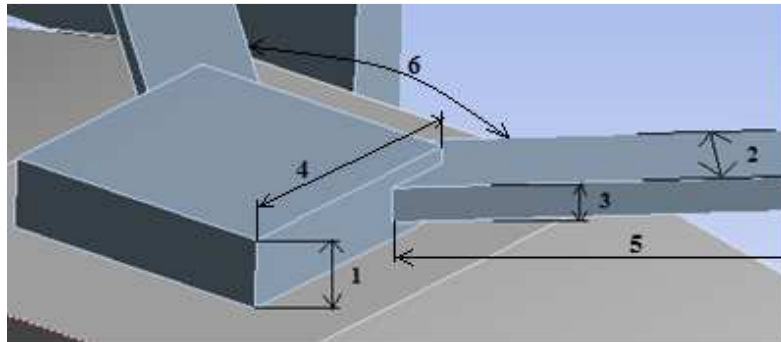


Рис.3.7. Деякі геометричні розміри біпода-пластини

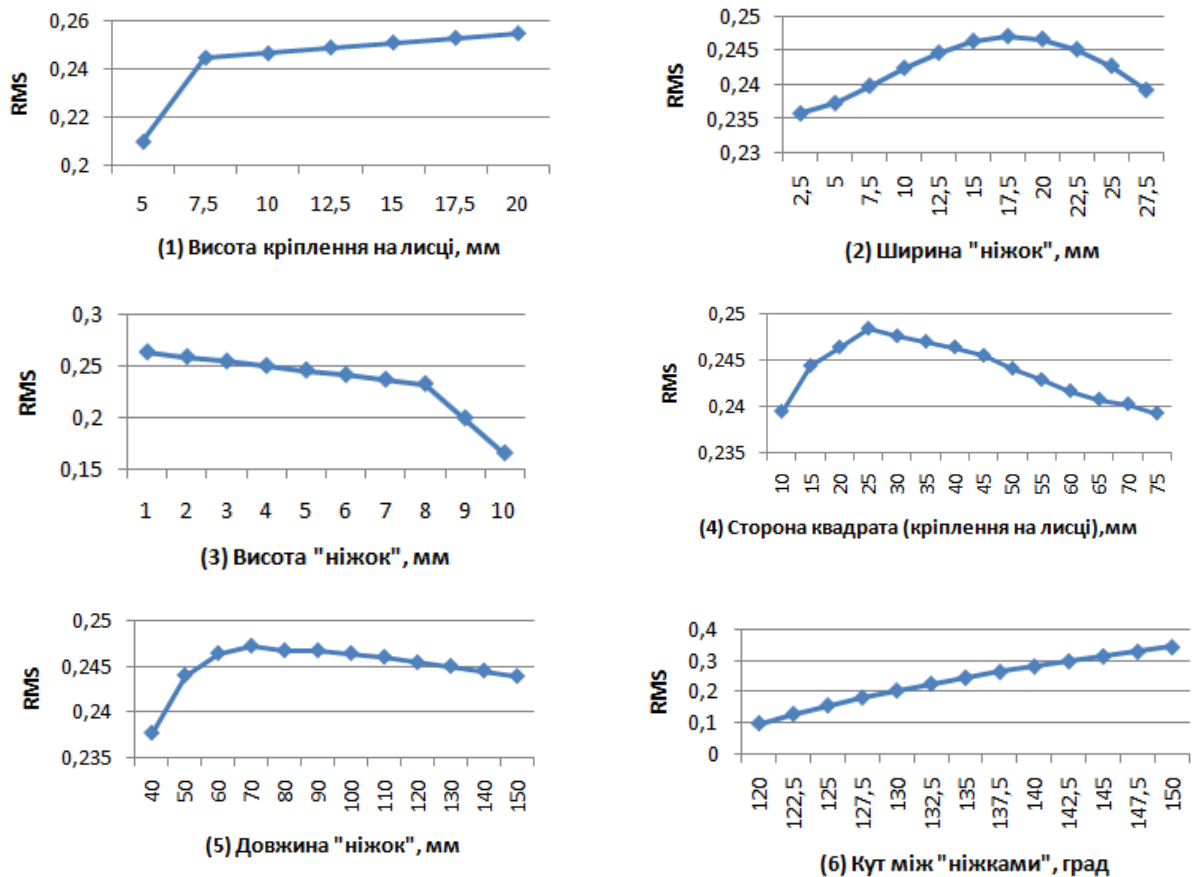


Рис. 3.8. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від геометричних розмірів біпода-пластини

Для позаосьового сегмента осесиметричного дзеркала є ще один параметр, який може суттєво впливати на деформацію - це положення дзеркала відносно однієї з найближчих граней, яке показано на рис.3.9.

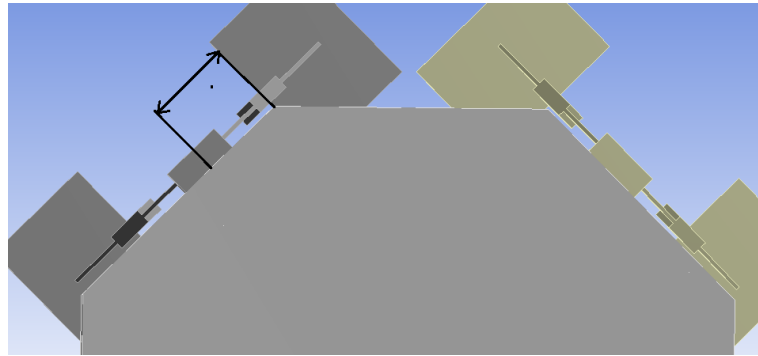


Рис.3.9. Положення кріплення відносно однієї з найближчих граней

На рис.3.10. показано залежність деформації дзеркальної поверхні від положення кріплення відносно однієї з найближчих граней. Як видно з графіка, найкраще положення кріплення буде при невеликій відстані від верхньої грані. Довжина фаски при цьому розрахунку - 75 мм.



Рис.3.10. Залежність деформації від положення кріплення відносно однієї з найближчих граней

Для кріплення на шарніри та втулки основним параметром, що впливає на деформацію робочої поверхні дзеркала є відстань від задньої грані до центра отвору під втулку. Інші геометричні параметри впливають несуттєво.

Положення дзеркала в кріпленні

Ще одним важливим моментом при розгляді кріплення є положення дзеркала відносно напрямку дії сили тяжіння. На рис.3.11. показані три з шести основних положень, яке може займати дзеркало. Проміжні положення не розглядаються.

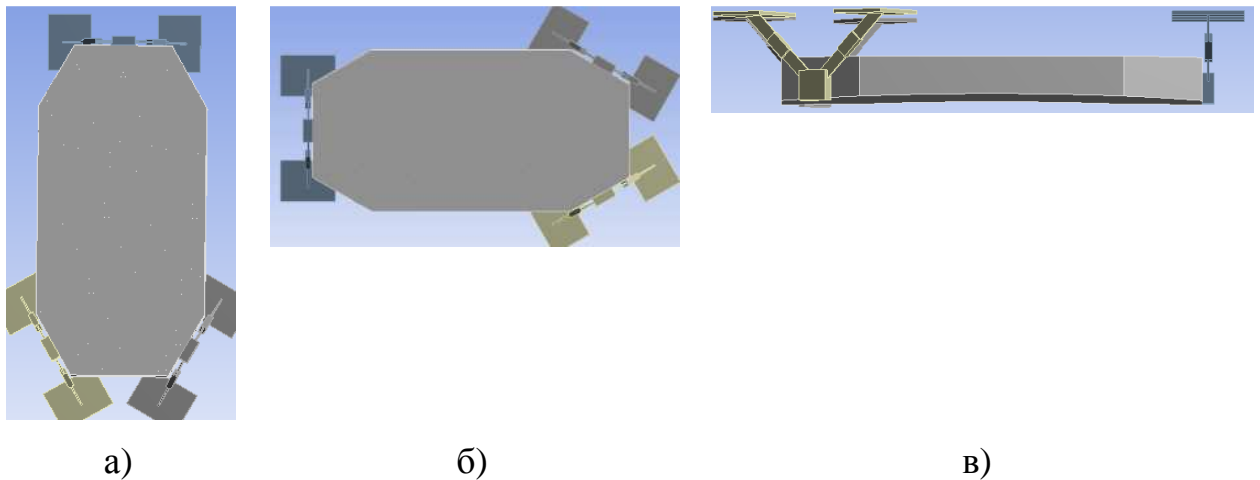


Рис.3.11. Три положення дзеркала у кріпленні. Сила тяжіння діє у площині
рисунокa вниз

Дослідження показали наступне:

- для осесиметричного дзеркала:
 1. якщо дзеркало розташоване вертикально (рис.3.11 *а* та *б*) (оптична вісь дзеркала перпендикулярна напрямку дії сили тяжіння), то деформація робочої поверхні не залежить від повороту дзеркала відносно оптичної осі;
 2. при розташуванні дзеркала горизонтально, деформація не залежить від положення (дзеркальна поверхня знизу чи зверху), однак вона збільшується більше ніж у 15 разів відносно деформації при вертикальному положенні;
- для позаосьового сегменту осесиметричного дзеркала:

1. при положенні вертикально (рис.3.11.*a*) деформація найменша та не залежить від положення кріплення (2 шарніри зверху чи знизу);
 2. при вертикальному положенні (рис.3.11 *б*) деформація буде збільшуватися приблизно у 3 – 4 рази, однак так само не буде залежати від положення кріплення (2 шарніри справа чи зліва);
 3. при горизонтальному положенні (рис.3.11 *в*) деформація буде ще більшою, ніж у п.2, однак при використанні дзеркал з відношенням меншої сторони до більшої більше 0,6 та відношенням його діагоналі до товщини менше 7 може спостерігатися незначне зменшення деформації;
- при вертикальному кріпленні (рис.3.11 *a*) відмінність результатів при різному положенні кріплення (2 шарніри зверху чи знизу) для двох типів дзеркал вказує на не оптимальне положення кріплення відносно задньої грані.

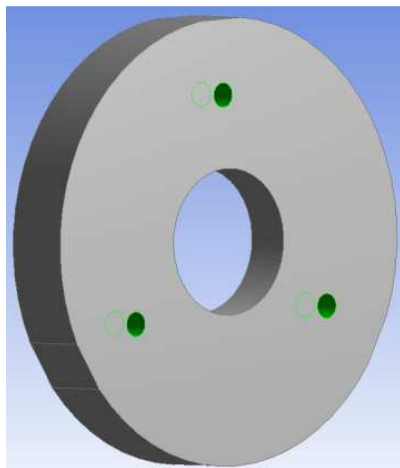
Горизонтальне кріплення будь-яких дзеркал без додаткових елементів дуже сильно збільшує деформацію. Однак при виготовленні дзеркал з діаметром більше 2 м та при використанні спеціальних пристроїв знеобтяження [82, 83] таке положення є найкращим. Таке кріплення вимагає великої кількості додаткового обладнання як при виготовленні, так і при виконанні контрольних операцій.

Для ЗФС найкращим варіантом дзеркал є дзеркала середнього розміру (з діаметром до 1 м). Такі дзеркала можливо кріпити вертикально (рис.3.11 *a*), що дає мінімальну деформацію без додаткових елементів та дозволяє у подальшому використовувати спрощену горизонтальну систему контролю [84, 85].

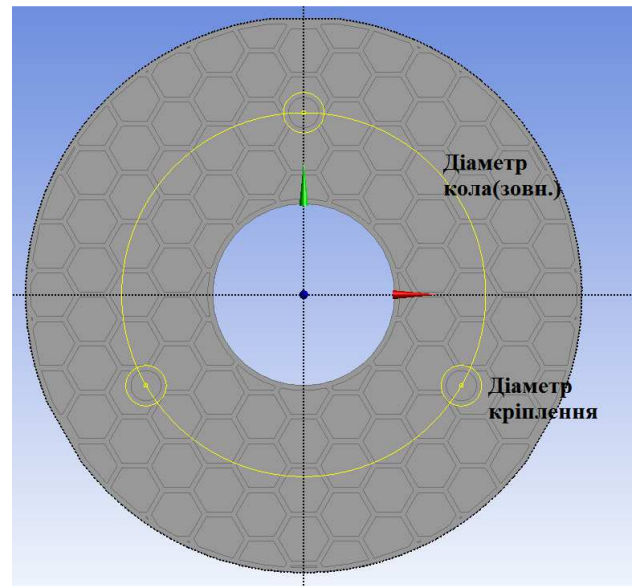
Тому всі подальші дослідження будуть проводитися при вертикальному положенні дзеркала (рис.3.11.*a*).

3.4.2. Кріплення за задню стінку

Кріплення за задню стінку представляє собою 3 отвори, що зроблені у задній стінці [44, 74, 86]. Далі у ці отвори може вклеюватися втулка, яка далі буде закріплена на оправі. Кріплення з деякими параметрами, що змінювалися при дослідженні, представлене на рис. 3.12.



а)



б)

Рис.3.12. Кріплення в ЗС: а) три отвори у задній стінці, б) параметри, що змінювалися при моделюванні

Для початку необхідно провести дослідження впливу повороту дзеркала відносно оптичної осі, тобто впливу розміщення отворів кріплення, на деформацію робочої поверхні дзеркала. Було промодельовано 6 варіантів розміщення отворів: від положення, коли 2 отвори знаходяться знизу (рис.3.12) з поворотом відносно оптичної осі через кожні 60° . Дзеркало при цьому розташоване вертикально. Аналіз показав, що RMS при цьому не змінюється, а отже деформація дзеркала не залежить від положення дзеркала та отворів для кріплення.

В якості геометричних параметрів кріплення, які моделювалися, були обрані наступні: діаметр кола, на якому розміщені отвори для кріплення, діаметр отворів для кріплення (діаметр кріплення), товщина стінок отворів для кріплення та їх глибина.

Деформація робочої поверхні при цьому типі кріплення залежить від форми отворів полегшення, що використовуються. Для даного дослідження обрані 2 типи отворів: кільцеві та шестикутні (рис.3.16 а, б).

На рис. 3.13 приведено залежність деформації дзеркала від діаметра кола, на якому розміщено отвори для кріплення. Як видно з графіків, для шестикутних вирізів чим більший діаметр кола, тим деформація більше. Для кільцевих вирізів є явний мінімум, який розташований на діаметрі, що дорівнює приблизно 0,6 від повного діаметра дзеркала. Також видно, що при обраних стандартних значеннях параметрів при моделюванні, для шестикутників кращим є варіант полегшення без ЗС, а для кільцевих вирізів - з ЗС.

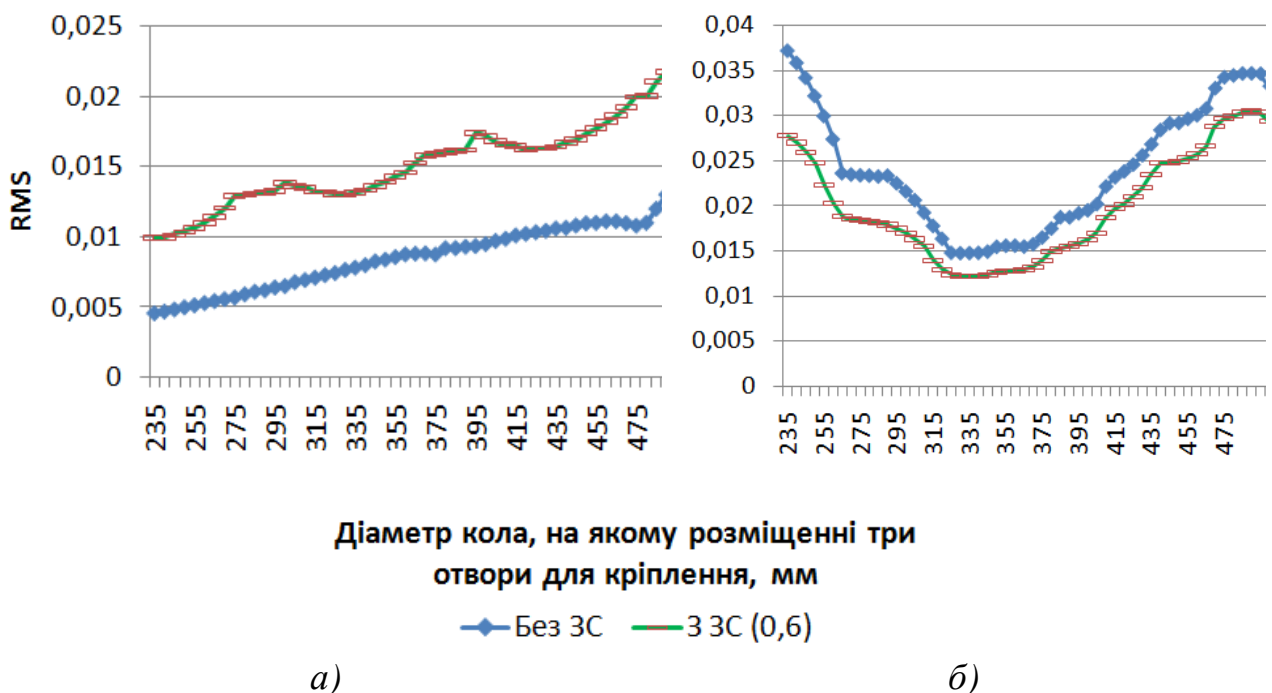
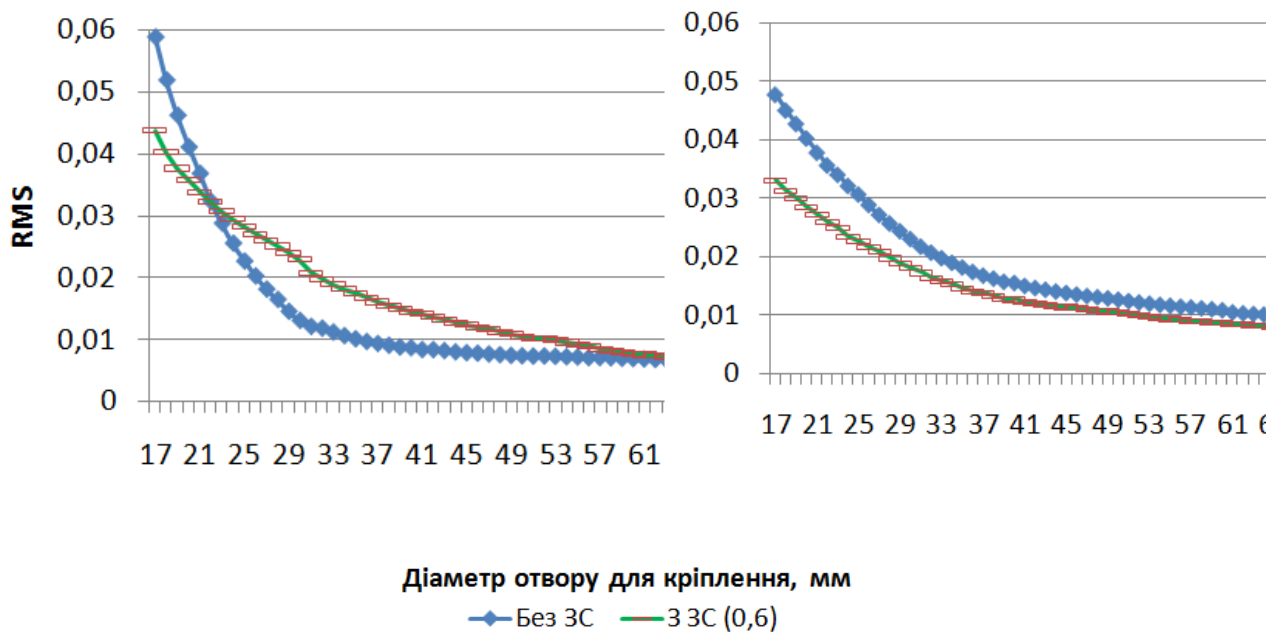


Рис.3.13. Залежність деформації дзеркала від діаметру кола, на якому розміщено три отвори для кріплення при використанні полегшення: а) шестикутної форми, б) кільцевої форми

Залежність деформації від діаметру отвору для кріплення має експоненційний вигляд - деформація зменшується при збільшенні діаметру (рис.3.14). Дане збільшення не призводить до зміни ваги дзеркала.



а)

б)

Рис.3.14. Залежність деформації дзеркала діаметру отворів для кріплення при використанні полегшення: а) шестикутної форми, б) кільцевої форми

На рис. 3.15 показані графіки залежності деформації від глибини отворів для кріплення. Треба звернути увагу, що весь аналіз для шестикутних вирізів був проведений для глибини отворів для кріплення 40 мм, що виявилось мінімумом для варіанта полегшення без ЗС. При цій глибині отворів варіант полегшення з ЗС має майже в два рази більшу деформацію. Для кільцевих вирізів такого не спостерігається, на обраній глибині обидва варіанти полегшення (з та без ЗС) мають майже однакове значення деформації.

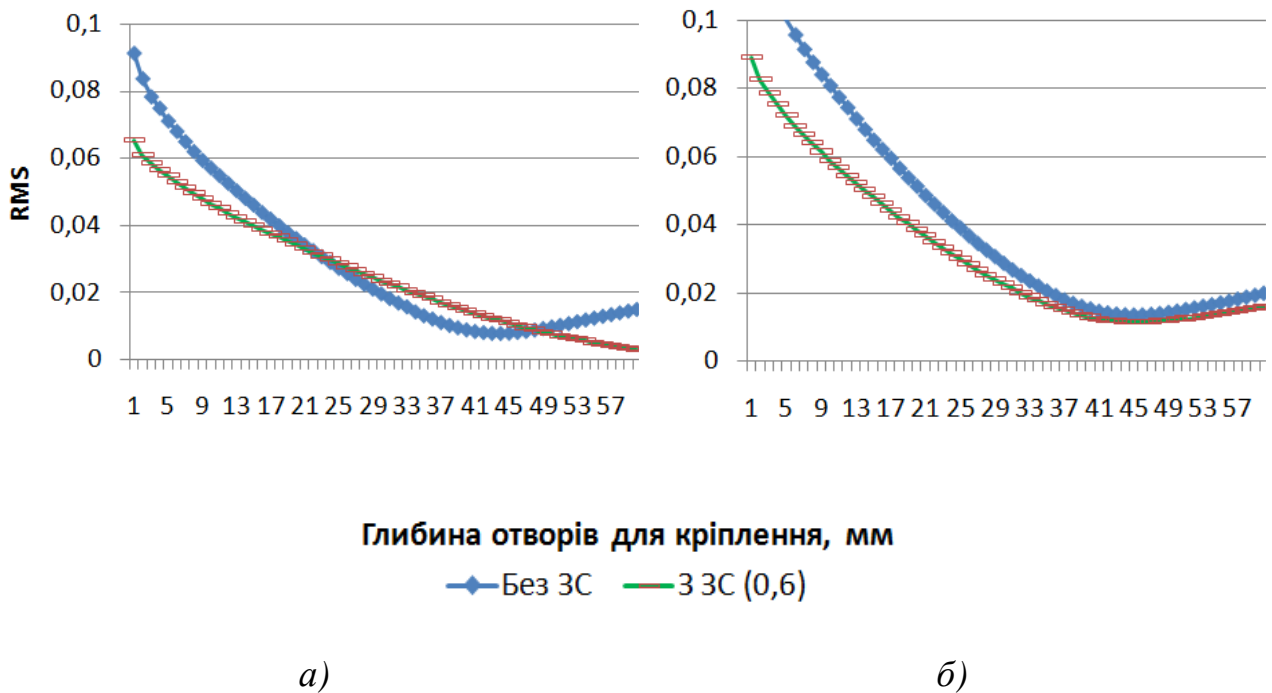


Рис.3.15. Залежність деформації дзеркала глибини отворів для кріплення при використанні полегшення: а) шестикутної форми, б) кільцевої форми

Зміна товщини стінок майже не впливає на деформацію дзеркала для обох видів полегшення.

3.5. Полегшення дзеркал вхідної оптики

Подальші дослідження були проведені при кріпленні дзеркала за допомогою трьох біподів.

3.5.1. Осесиметричні дзеркала

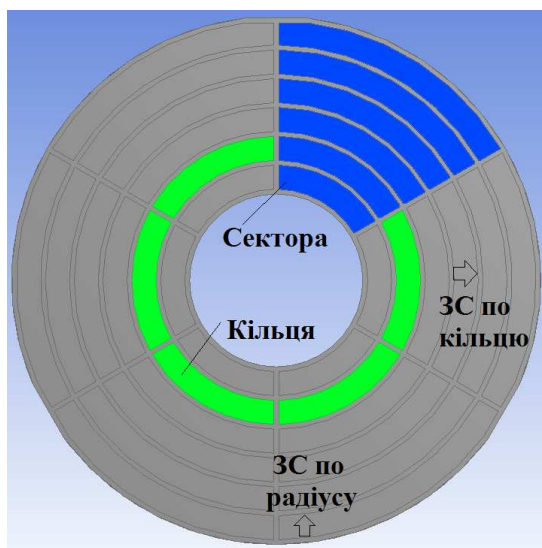
Для дослідження можливостей полегшення осесиметричних дзеркал, було обрано два класичні типи полегшення: кільцеві (3.16 *а*) та шестикутні (рис. 3.16 *б*) вирізи. Для таких отворів дослідження проводилися з відкритою задньою частиною (без ЗС) та з ЗС з отворами. У процесі дослідження змінювалися всі геометричні параметри дзеркала (товщина ребра, глибина

отворів полегшення, сторона шестикутника або кількість сегментів та кілець, ...), включаючи конструктивні (діаметр дзеркала та внутрішнього отвору, його товщина та радіус дзеркальної поверхні). Максимальне зменшення ваги, яке можливо отримати (при найменшій товщині ребра 5 мм) наступні: шестикутні вирізи – 71%, кільцеві вирізи – 68%.

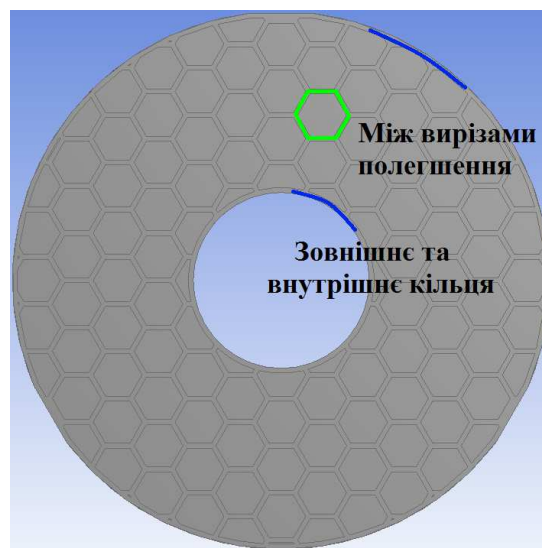
Також розглядалися два варіанти полегшення з трикутними отворами: звичайними (рис.3.16 в) та симетричними (рис.3.16 з). Однак використання таких отворів не дозволяє досягти максимального зменшення ваги (полегшення складає 56% та 59% відповідно).

Для розуміння, які з геометричних параметрів полегшення та конструктивних параметрів дзеркала впливають на деформацію робочої поверхні найбільше, необхідно провести дослідження. Далі наведені деякі його результати для шестикутних та кільцевих вирізів для двох типів кріплення: кріплення за три отвори у ЗС та кріплення за лиски. Для кільцевих вирізів графіки залежностей мають майже такий самий вигляд, як і для шестикутних, тому наведені лише останні. Для даного дослідження було обрано дзеркало з діаметром 500мм.

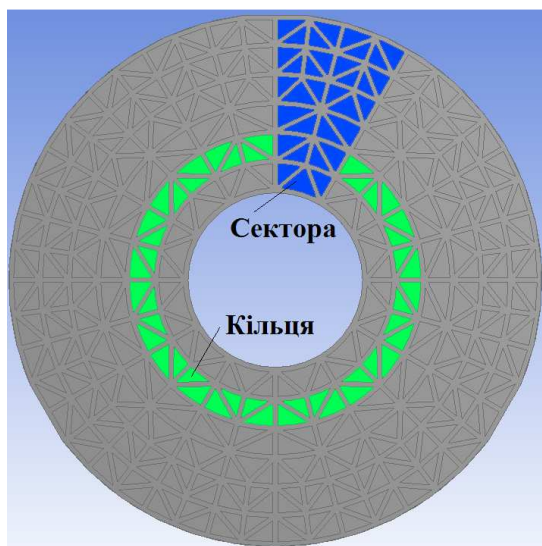
При збільшенні діаметра дзеркала деформація збільшується для обох варіантів полегшення майже однаково (400 мм - $0,008\lambda$, 800 мм - $0,03\lambda$). Діаметр центрального отвору майже не впливає на деформацію не залежно від типу полегшення. Графік залежності деформації від радіуса дзеркальної поверхні має експоненційний вид: при збільшенні значенні радіуса до приблизно 1000 мм деформація різко зменшується, при подальшому збільшенні радіуса значення деформація майже не змінюється. Параметри, що розглянуті, вибираються з оптичних міркувань, тому вони не розглядаються при мінімізації деформацій.



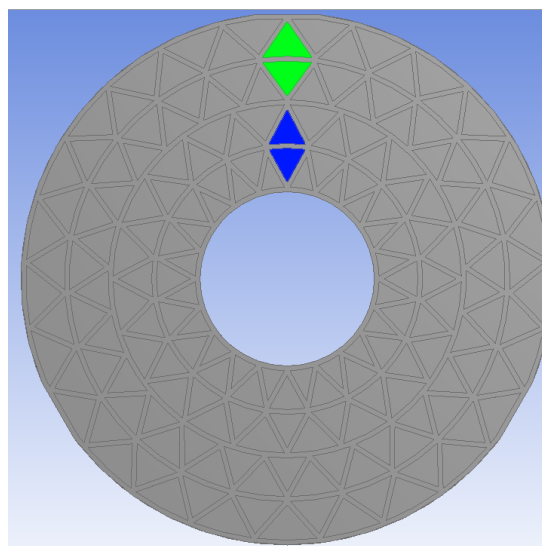
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.16. Типи полегшення: а) кільцеві вирізи, б) шестикутні вирізи, в) трикутні вирізи, г) симетричні трикутні вирізи

Залежність деформації дзеркала від його товщини представляє більший інтерес, так як від нього не залежать оптичні властивості дзеркала. Залежності деформації від товщини для двох варіантів кріплення представлені на рис. 3.17. Для обох варіантів кріплення та полегшення, кращим варіантом є використання ЗС, що зменшує деформацію.

Дослідження залежності деформації від товщини дзеркал проводилося за умови, що глибина отворів для кріплення (при кріпленні за 3 отвори у ЗС) дорівнювала товщині дзеркала у кожній досліджуваній точці. Це призводить до того, що графіки подальших досліджень (де значення глибини отворів є постійним на протязі дослідження) будуть зміщені по осі ОУ на деяку величину. При цьому форма графіків не змінюється.

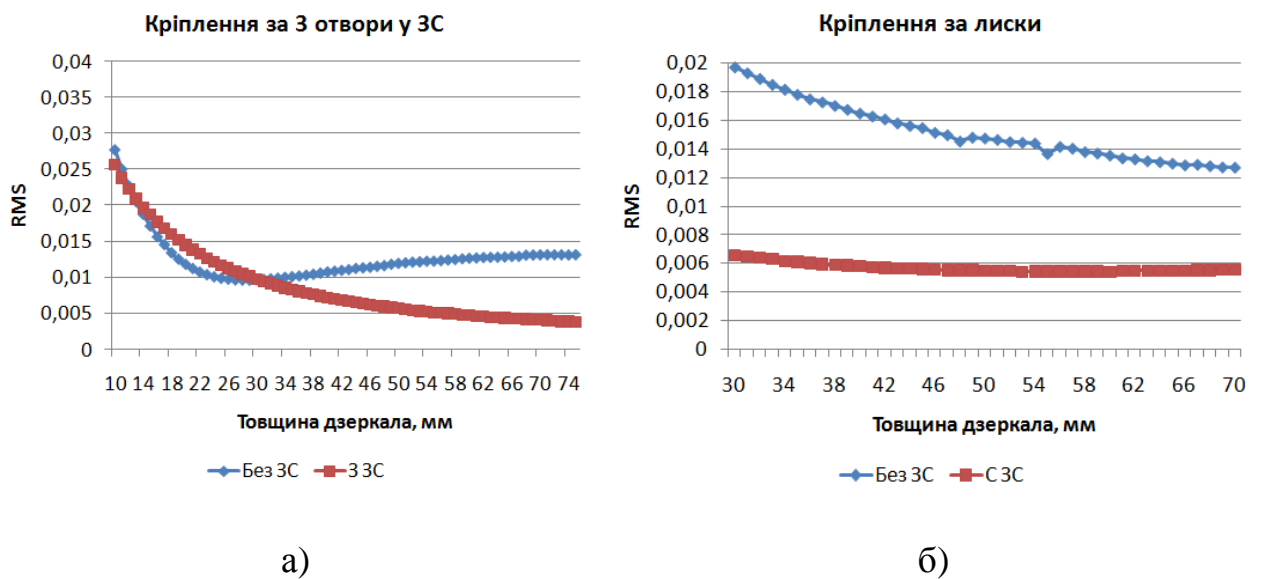


Рис.3.17. Залежність деформації дзеркальної поверхні від товщини дзеркала при: а) кріпленні за 3 отвори у ЗС, б) при кріпленні за лиски

На рис.3.18. показані залежності деформації дзеркальної поверхні від товщини ребер між отворами полегшення. З графіків видно, що при кріпленні за 3 отвори у ЗС для шестикутних отворів деформація дзеркала не залежить від товщини ребер при використанні дзеркала з ЗС. При використанні дзеркала без ЗС є явний мінімум при товщині ребер приблизно 4,5 мм. При використанні кільцевих вирізів графік має майже лінійний вид та зменшується при збільшенні розміру ребра. При кріпленні за лиски найменша деформація спостерігається при використанні ЗС.

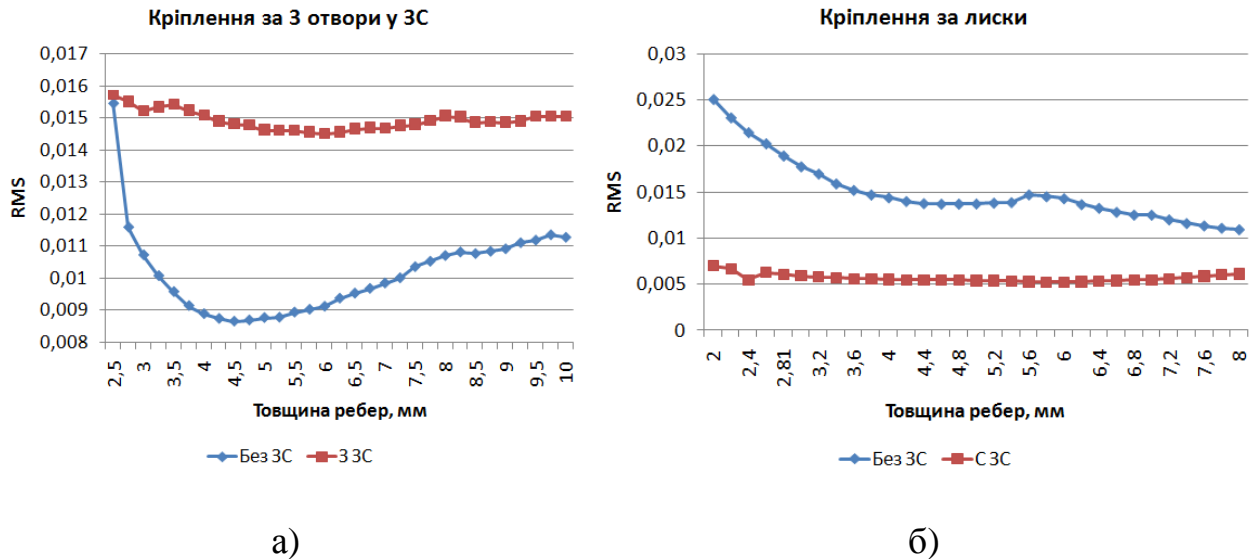


Рис.3.18. Залежність деформації дзеркальної поверхні від товщини ребер при:

а) кріпленні за 3 отвори у ЗС, б) при кріпленні за лиски

На рис.3.19. приведена залежність деформації робочої поверхні дзеркала від розміру сторони шестикутника. При використанні кріплення за 3 отвори деформація сильно залежить від розміру сторони шестикутника, кращим варіантом є полегшення без ЗС. При кріпленні за лиски деформація змінюється плавно, кращим варіантом є полегшення з ЗС.

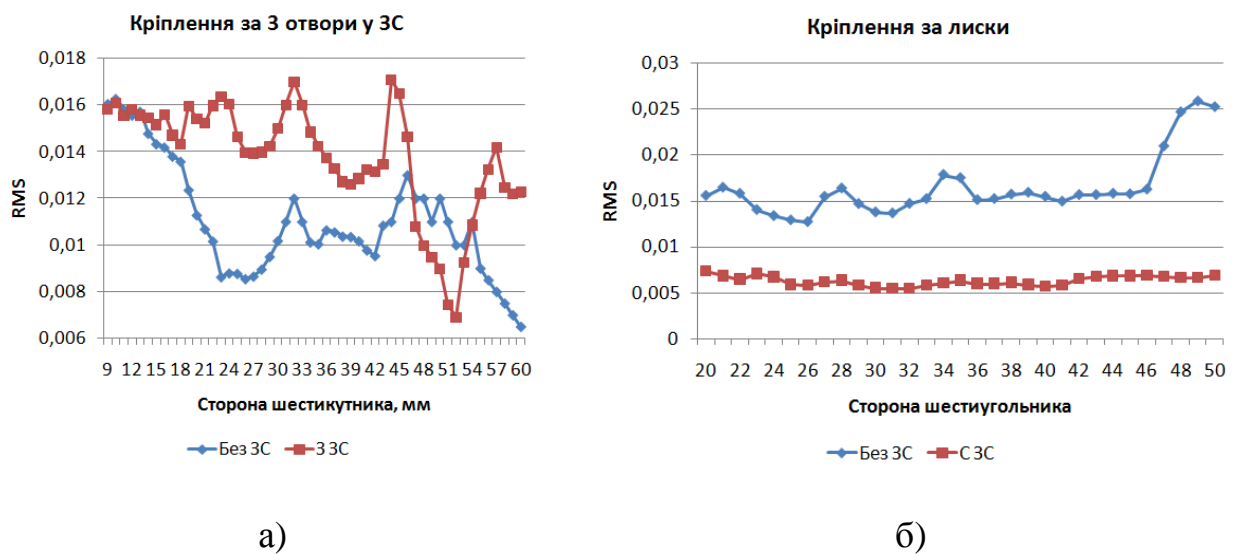


Рис.3.19. Залежність деформації дзеркальної поверхні від розміру сторони шестикутника при: а) кріпленні за 3 отвори у ЗС, б) при кріпленні за лиски

Для кільцевих вирізів параметрами полегшення є кількість кілець з вирізами та кількість вирізів у кільцях [86, 87]. При збільшенні кількості кілець жорсткість дзеркала збільшується, однак вага також збільшується. Теж саме спостерігається при збільшенні кількості вирізів у кільцях.

Наступним параметром є глибина полегшення. Задачею полегшення є зменшення маси дзеркала, тому при використанні будь-якого типу полегшення доцільно буде робити отвори полегшення максимально глибокими. Однак буде цікаво дослідити залежність деформації від глибини отворів.

На рис. 3.20 наведений графік залежності деформації робочої поверхні дзеркала від глибини отворів полегшення. Вид наведеного графіка характерний для всіх типів кріплення та полегшення, що розглядаються. З графіка видно, що при використанні дзеркал без полегшення жорсткість системи буде висока, а отже, деформація малою. Однак при використанні дзеркал з полегшенням з найглибшими отворами деформація буде ще меншою. Це відбувається тому, що маса дзеркала зменшується швидше, ніж його жорсткість і дзеркалу легше тримати свою форму. Застосовувати отвори з меншими глибинами не доцільно, так як при цьому деформація та вага значно зростають.

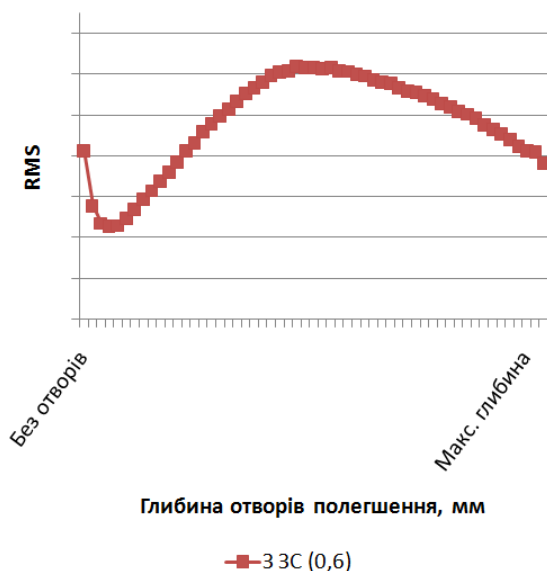
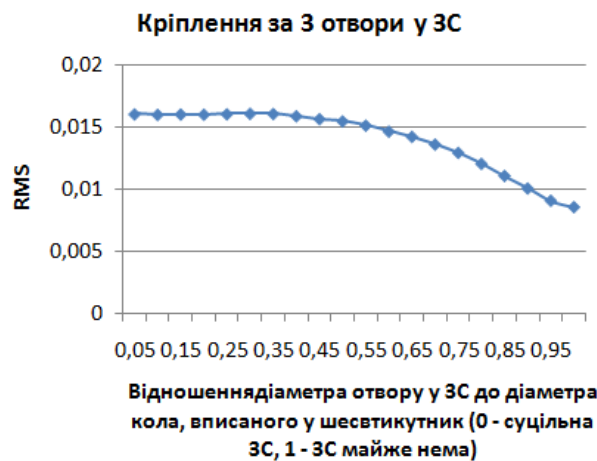
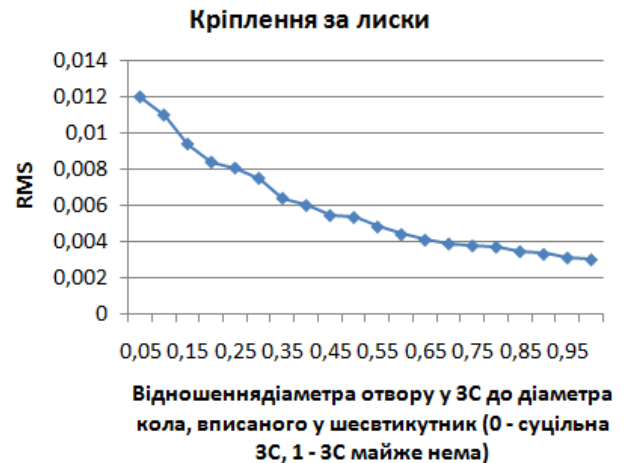


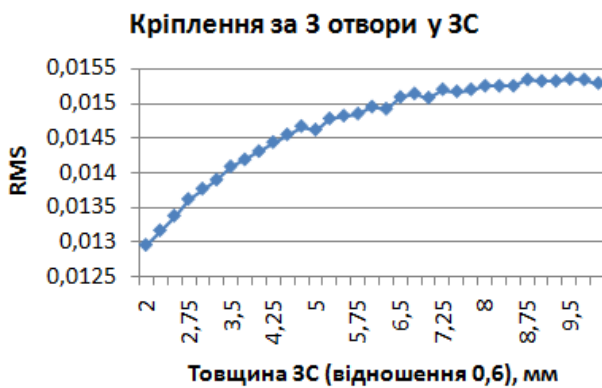
Рис.3.20. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від глибини отворів полегшення



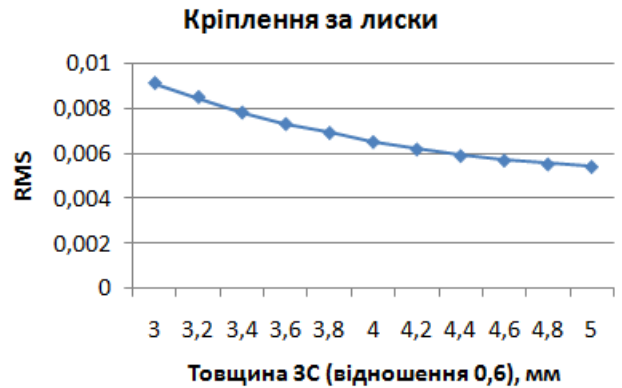
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.21. Залежність деформації дзеркала від діаметра отвору у ЗС та її товщини для: а, в) кріпленні за 3 отвори у ЗС, б,г) при кріпленні за лиски

На рис.3.21. наведено графіки залежності деформації робочої поверхні дзеркала при використанні ЗС з різним діаметром отворів та товщиною. Як видно з графіків, для кріплення за 3 отвори у ЗС значення деформації значно менше при відсутності ЗС. Те саме спостерігається для кільцевих вирізів. Однак для кріплення за лиски спостерігається зворотній ефект – значення деформації менші при наявності ЗС.

3.5.2. Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал

Для дослідження впливу геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал обрано полегшення з отворами шестикутної форми. Таке полегшення дозволяє отримати найбільше зменшення ваги дзеркала при відносно простому процесі виготовлення. Полегшення обране без ЗС. В якості кріплення обрано кріплення за фаски на біподах.

До основних геометричних параметрів, які впливають на деформацію робочої поверхні дзеркал можна віднести розмір сторони шестикутника, товщину ребер та кут нахилу фаски. Розглянемо вплив детально.

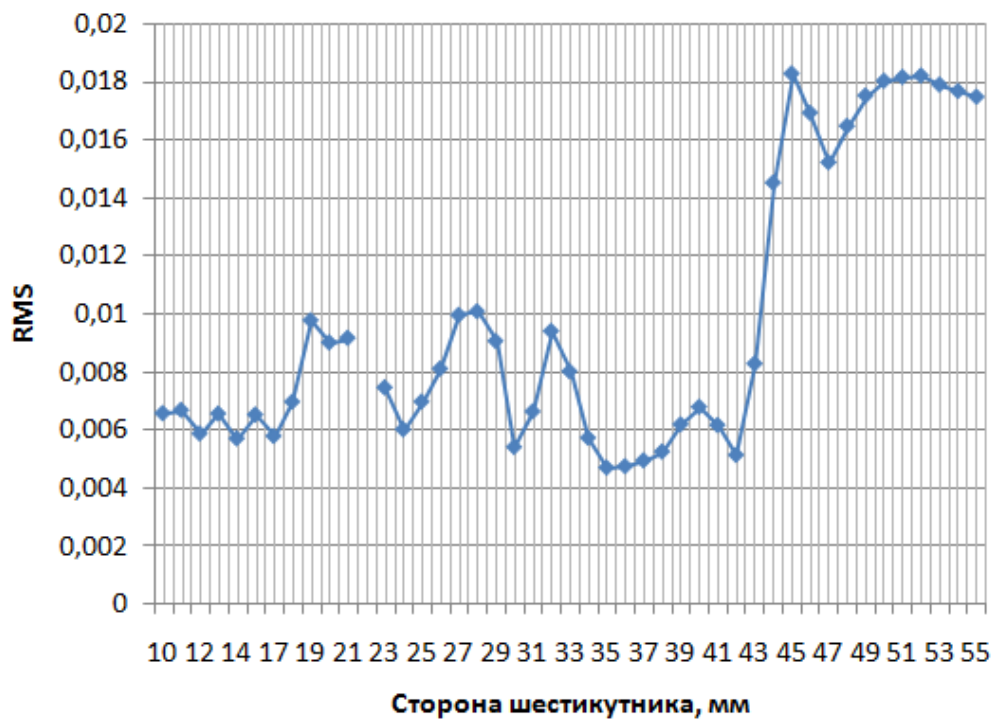


Рис.3.22. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від розміру сторони шестикутника

На рис.3.22 наведено залежність деформації від розміру сторони шестикутника. З графіка видно, що після деякого значення розміру сторони шестикутника деформація набагато збільшується. Також графік має

пікоподібну форму через те, що зі зміною розміру шестикутника змінюється розстановка ребер на краю дзеркала, що призводить до різкої зміни деформації. Для кожного розміру дзеркала необхідно провести таке дослідження, щоб знайти оптимальний розмір шестикутника. При збільшенні його розміру вага зменшується.

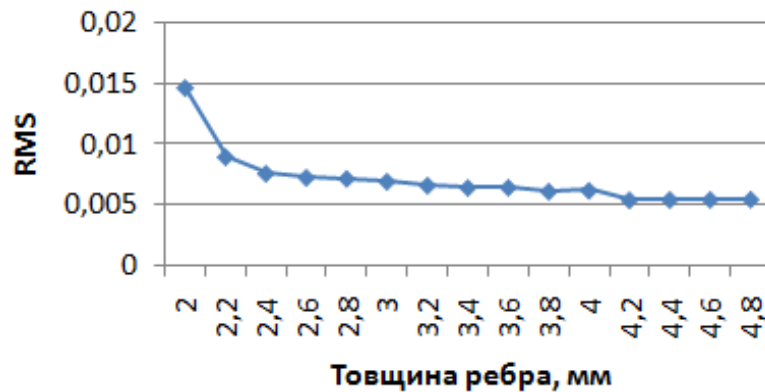


Рис.3.23. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від товщини ребра



Рис.3.24. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від кута нахилу фасок

З рис.3.24 видно, що кут нахилу фаски досить сильно впливає на деформацію робочої поверхні. Мінімум спостерігається при куті приблизно у 45°.

3.6. Вплив розмірів та форми дзеркал вхідної оптики на вибір конструкції їх полегшення

Розміри та форма дзеркал вхідної оптики є параметрами, які вибираються з оптичних міркувань, однак від них залежить яку конструкцію полегшення (без ЗС, з ЗС з отворами або з суцільною ЗС) необхідно буде обирати. Далі приводиться дослідження впливу розмірів та форми осесиметричних та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал вхідної оптики на вибір конструкції їх полегшення[88].

Осесиметричні дзеркала

Для дослідження типу полегшення (з ЗС або без неї) на деформацію робочої поверхні були обрані чотири осесиметричні дзеркала діаметром 650мм, 550 мм, 450 мм та 350мм. Всі дзеркала мають центральний отвір, діаметр якого складає 30% від діаметра дзеркала. Розрахунок деформації проводився при шести значеннях товщини дзеркала (30, 38, 46, 55, 64 та 70 мм) при оптимальному положенні кріплення. Кожна точка на всіх графіках відповідає зміщенню кріплення на 0,1 мм. Під полегшенням з ЗС, при проведенні даного дослідження, мається на увазі полегшення з круглими отворами у ЗС, відношення діаметра яких до діаметру вписаного у шестикутник кола дорівнює 0,6.

На рис. 3.25. приведені графіки деформації робочої поверхні для одного з чотирьох дзеркал, обраних для дослідження. На графіках показана залежність деформації від товщини дзеркала, положення кріплення та наявності чи відсутності ЗС.

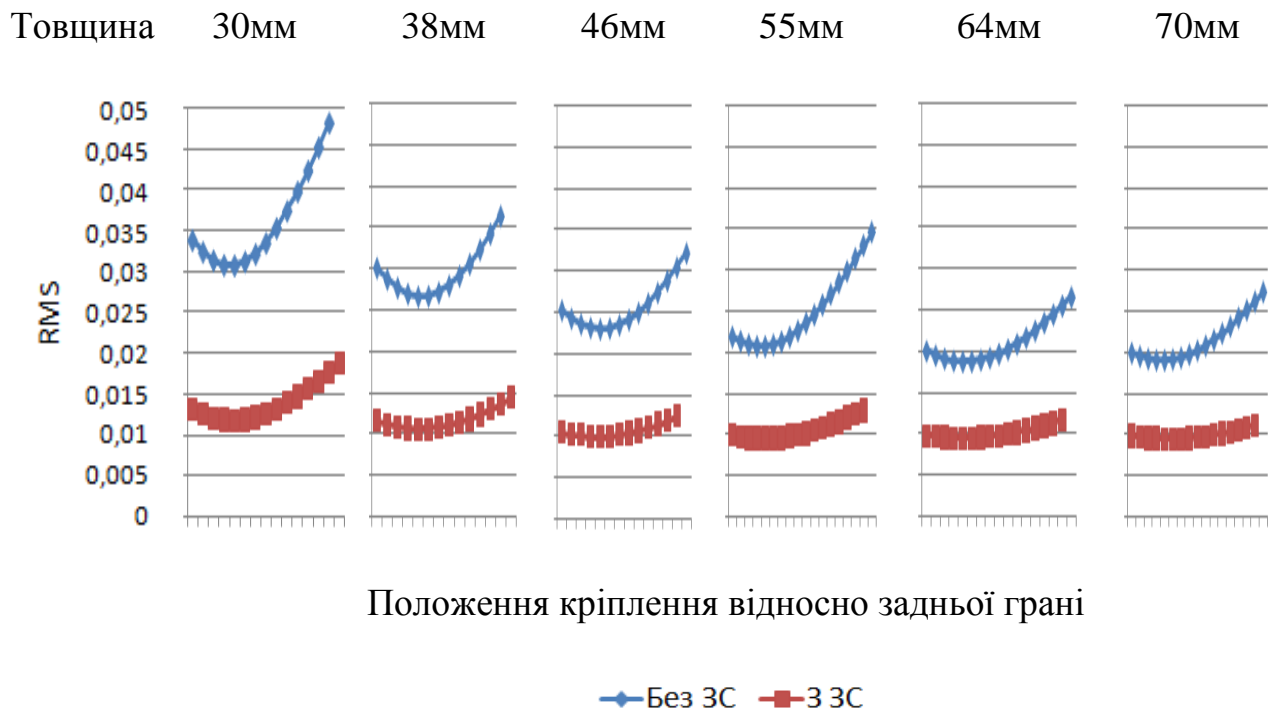


Рис.3.25. Деформація робочої поверхні для дзеркала 650мм

Як видно з графіків на рис.3.25, при збільшенні товщини дзеркала деформація робочої поверхні зменшується для обох варіантів полегшення, але для варіанта без ЗС сильніше. Різниця між деформаціями при відсутності та наявності ЗС зменшується у 2 рази при зміні товщини з 30 до 70 мм. Також видно, що чим товще дзеркало, тим менше впливає положення кріплення на деформацію, хоча для осесиметричного дзеркала це проявляється набагато слабше, ніж для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал.

Для дзеркал з іншими діаметрами спостерігаються такі самі залежності, однак зі зменшенням діаметра дзеркала деформація зменшується і графіки зміщуються вниз по осі Y (рис.3.26).

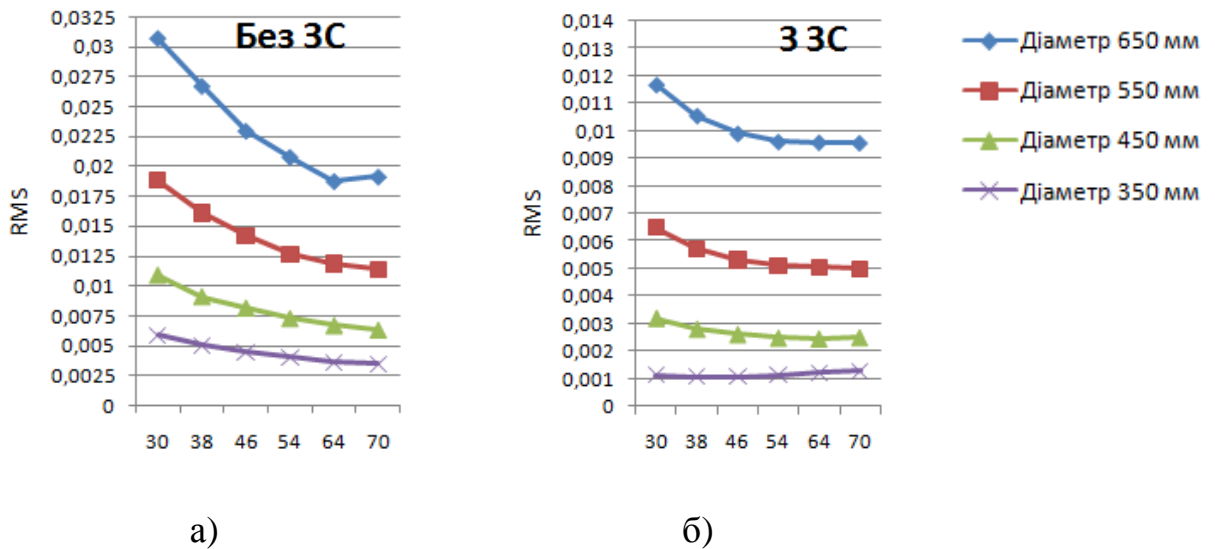


Рис.3.26. Деформація робочої поверхні для осесиметричних дзеркал з різними діаметрами: а) без ЗС, б) з ЗС

На рис. 3.27 – 3.30 представлені залежності деформацій для чотирьох осесиметричних дзеркал, що були обрані для дослідження.

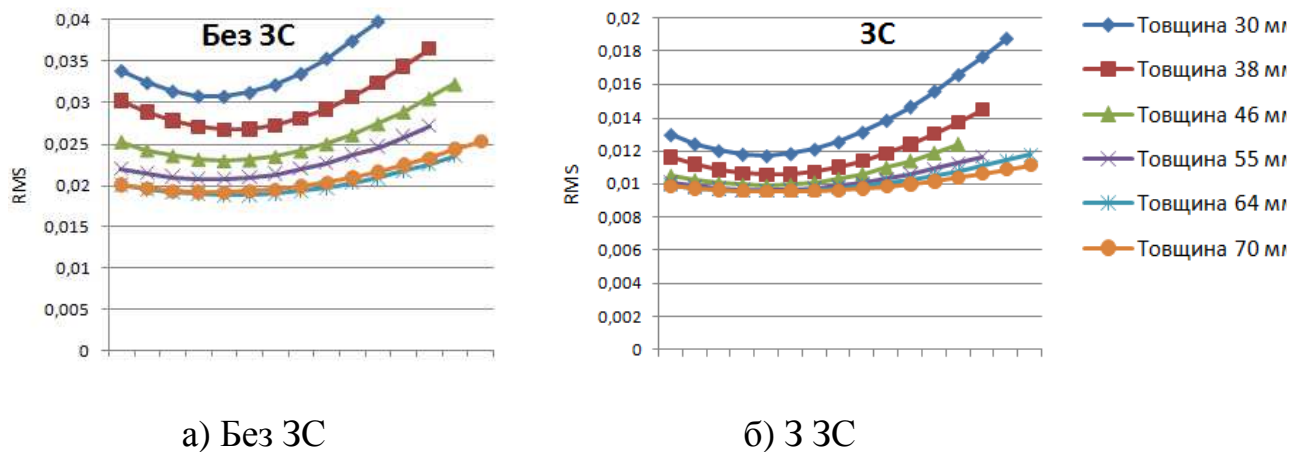
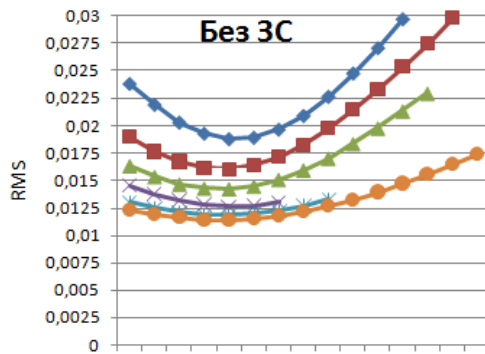
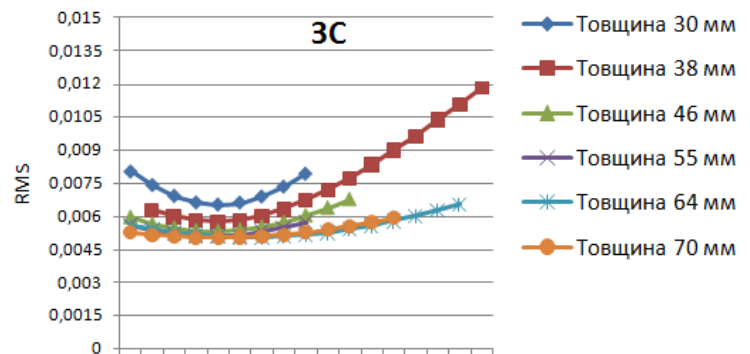


Рис.3.27. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 650 мм

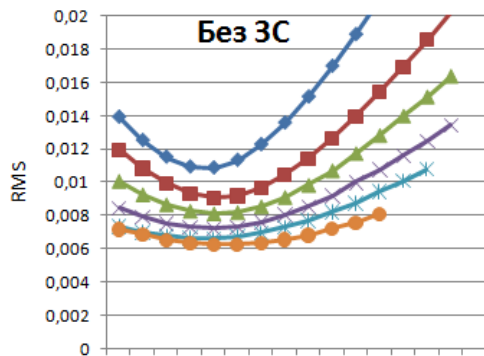


а) Без 3С

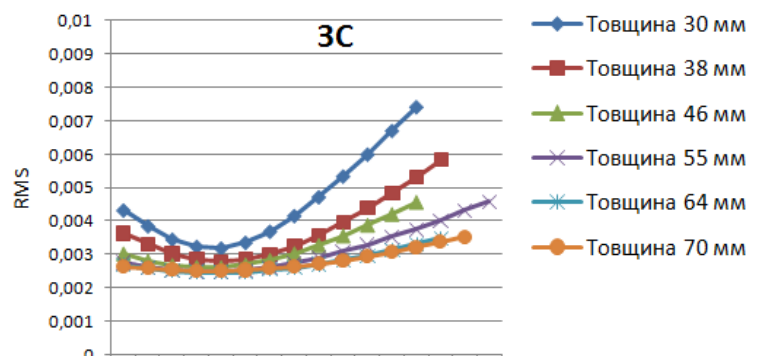


б) 3С

Рис.3.28. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 550 мм

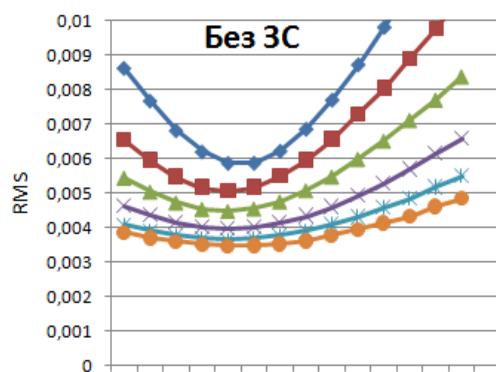


а) Без 3С

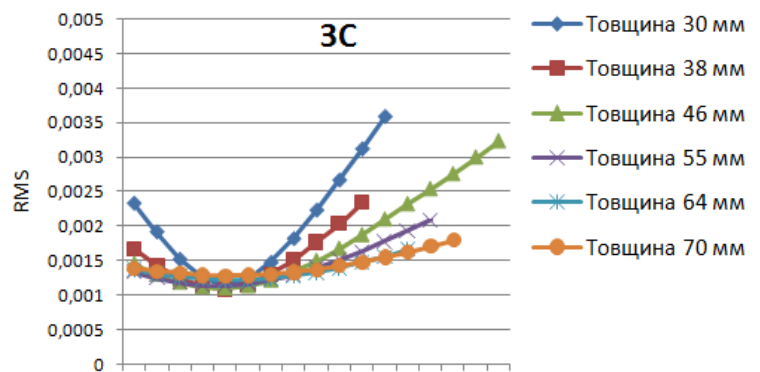


б) 3С

Рис.3.29. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 450 мм



а) Без 3С



б) 3С

Рис.3.30. Деформація робочої поверхні для дзеркала діаметром 350 мм

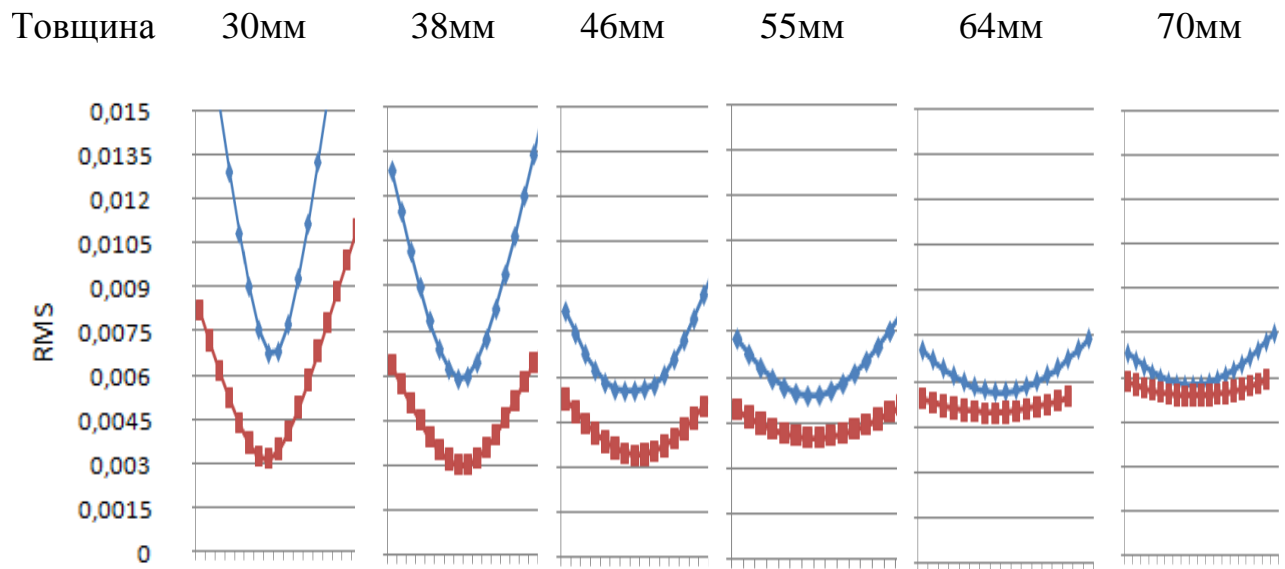
З графіків на рис. 3.27 – 3.30 видно, що для всіх дзеркал без ЗС різниця між значеннями деформації для різної товщини дзеркала залишається майже однаковою. Найменша деформація спостерігається при товщині дзеркала 70 мм, найбільша – при 30 мм.

Для всіх дзеркал з ЗС спостерігається явне зміщення графіків та зміна їх форми – для більшого дзеркала мінімум деформації при товщині 70, максимум – при 30 мм. Однак для найменшого з обраних діаметрів дзеркала мінімум деформації буде при товщині дзеркала 38 мм. На рис.3.30 б видно зміну форми кривої для найменшого з діаметрів. Також зі зменшенням діаметра дзеркала графіки стають більш вигнуті, тобто зміщення кріплення від оптимального положення буде сильніше впливати на деформацію. Такий самий ефект спостерігається і для дзеркал без ЗС, однак там він дуже слабкий.

Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал

Для дослідження впливу типу полегшення на деформацію робочої поверхні були обрані прямокутні позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал з більшим розміром 400 мм. Менший розмір дорівнював 280мм (відношення меншої сторони до більшої 0,7), 240 мм (0,6), 200 мм (0,5). Також змінним параметром була товщина дзеркала. Для дослідження було обрано шість її значень: 30, 38, 46, 55, 64, 70 мм. Для кожного дзеркала та для кожного значення товщини знаходилося оптимальне положення кріплення для мінімізації деформації. Кожна точка на всіх графіках відповідає зміщенню кріплення на 0,1 мм.

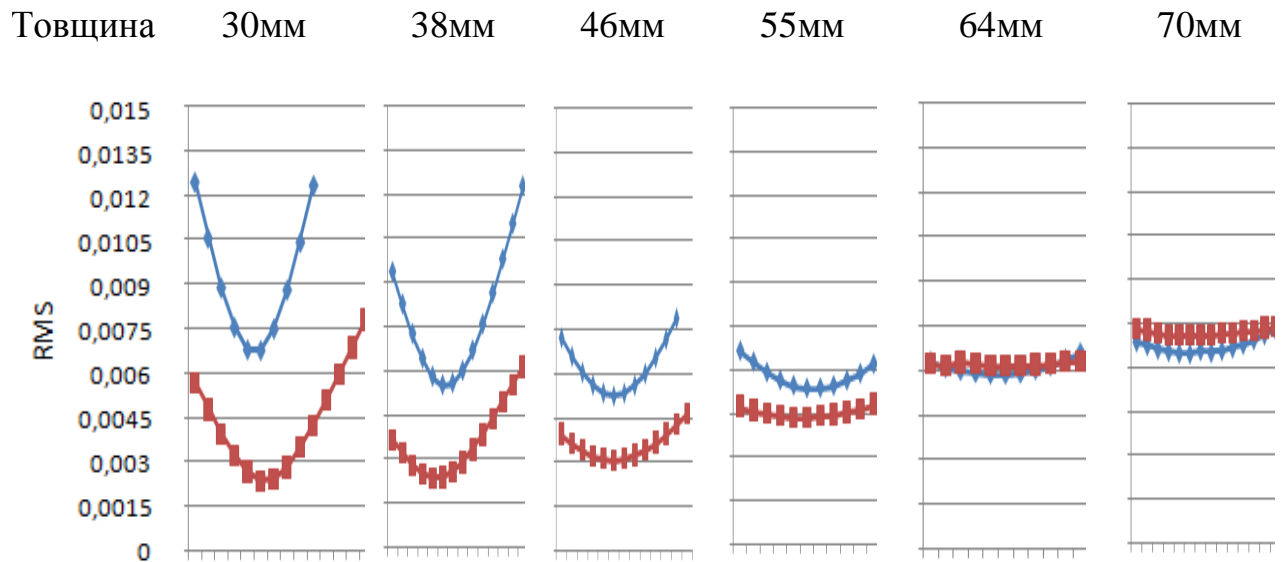
На рис. 3.31 – 3.33 представлені графіки деформації робочої поверхні 3-х обраних для дослідження дзеркал з ЗС та без неї при різній товщині дзеркала та різному положенні кріплення відносно задньої грані.



Положення кріплення відносно задньої грані

Без ЗС З ЗС

Рис.3.31. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400x280мм (0,7)



Положення кріплення відносно задньої грані

Без ЗС З ЗС

Рис.3.32. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400x240мм (0,6)

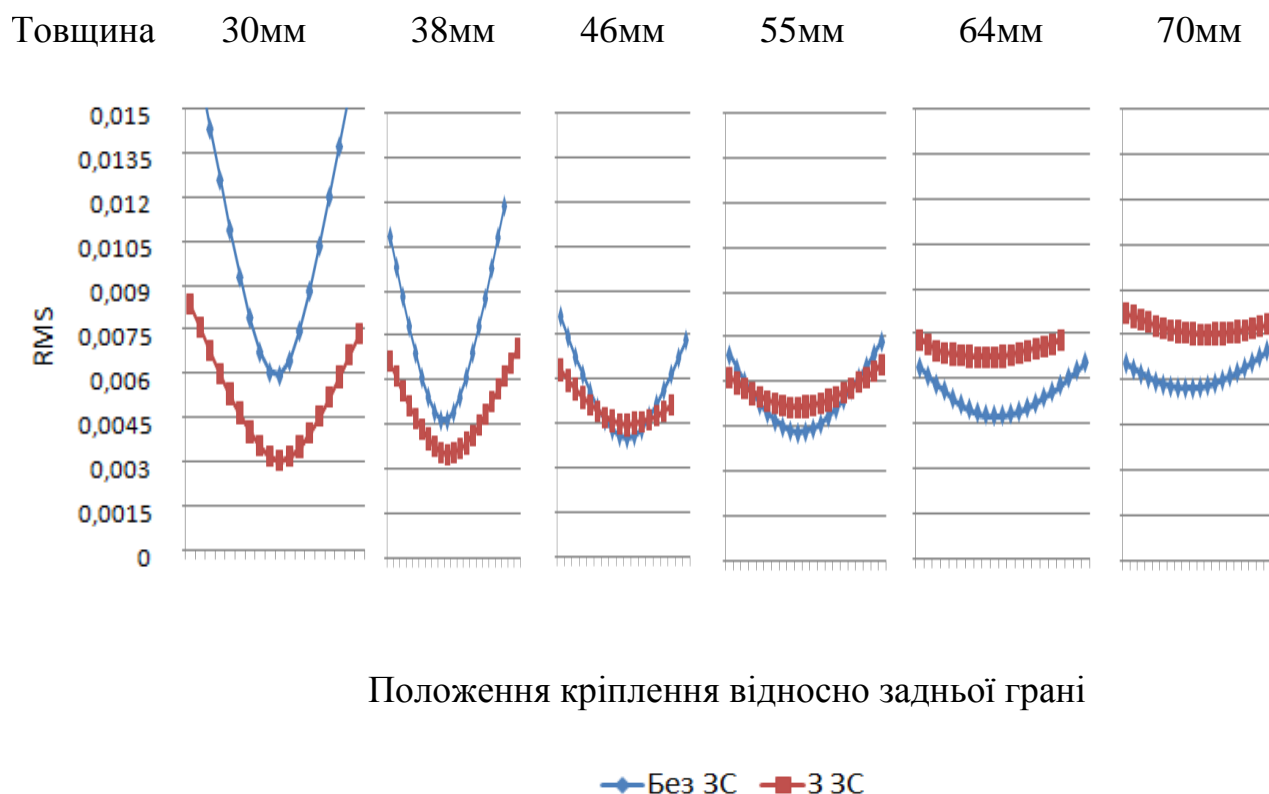


Рис.3.33. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400x200мм (0,5)

Як видно з графіків, незалежно від розміру дзеркала чим воно товще, тим менше впливає положення кріплення на деформацію. Різниця між деформацією робочої поверхні дзеркал без ЗС та з ЗС зменшується при збільшенні товщини дзеркала. При звуженні дзеркала ця різниця стає від'ємною, тобто деформація без ЗС стає меншою від деформації з ЗС. При використанні більш вузького дзеркала можна використовувати полегшення без ЗС.

На рис.3.34. приведена деформація робочої поверхні для дзеркала 400x200 мм. При такому представленні даних видно, що найменша деформація для даного дзеркала без ЗС буде при товщині приблизно 46 мм, в той час при наявності ЗС – при 30. Для інших дзеркал форма графіків буде такою самою, однак вони будуть зміщуватися по осі Y.

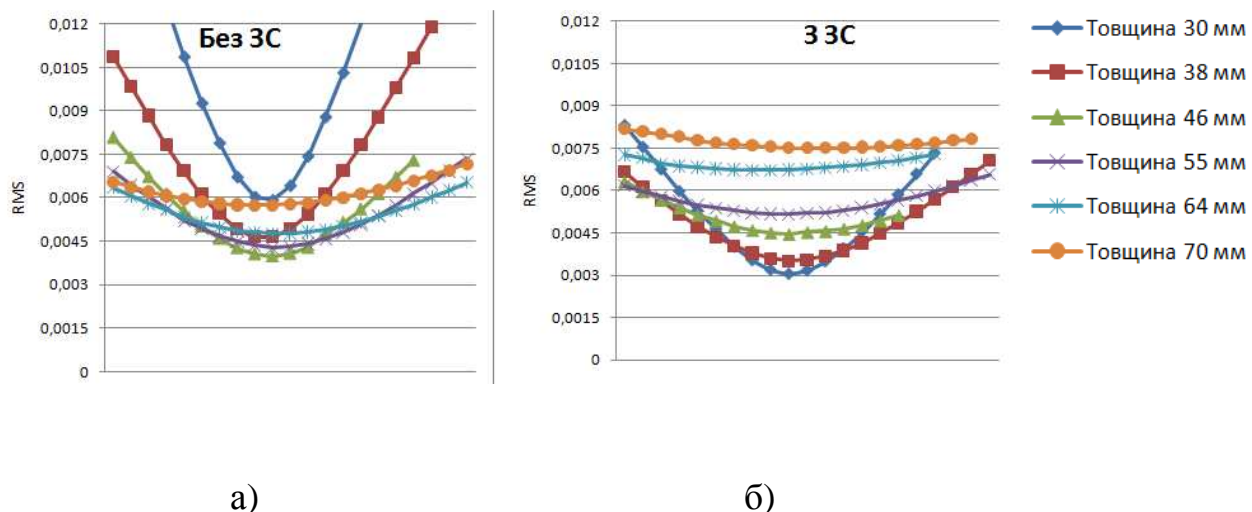


Рис.3.34. Деформація робочої поверхні для дзеркала 400x200 мм (0,5): а) без ЗС, б) з ЗС

Також з графіків рис. 3.31 – 3.34 видно, що для дзеркал з ЗС деформація збільшується лінійно майже в 2 рази при зміні товщини з 30 до 70 мм. Для дзеркал без ЗС спостерігається спочатку зменшення деформації при збільшенні товщини до приблизно 46 мм, а потім її збільшення зі збільшенням товщини дзеркала.

В результаті досліджень встановлено, що при використанні вузьких позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал з відношенням меншої сторони до більшої 0,5 та менше можливо застосовувати полегшення без ЗС. Це дає змогу зменшити вагу дзеркала при отриманні мінімальної деформації робочої поверхні. При збільшенні відношення сторін рекомендується використовувати ЗС з отворами для зменшення деформації, однак в такому випадку трохи збільшується вага дзеркала та складність виробництва.

При використанні осесиметричних дзеркал при малих діаметрах (до приблизно 400 мм) також можна обійтися полегшенням без ЗС. Однак при подальшому збільшенні діаметра дзеркала деформація збільшується і необхідно використовувати полегшення з ЗС з отворами. При діаметрах дзеркала більше 650 мм деформація зростає досить сильно, і для її

зменшення можливо використовувати суцільну (без отворів) ЗС. При її використанні вага дзеркала збільшується, складність виробництва збільшується суттєво, однак деформація зменшується приблизно на 40% відносно ЗС з отворами.

Для обох типів дзеркал також можна вибирати товщину дзеркала для мінімізації ваги та деформації, однак при значному зменшенні товщини збільшується ризик отримання бракованого дзеркала.

3.7. Пошук оптимальних параметрів полегшення дзеркал вхідної оптики

Під час дослідження кожний параметр змінювався від мінімуму до максимуму при сталому значенні інших параметрів. Для зменшення машинного часу на розрахунки та визначення оптимальних геометричних параметрів полегшення, які будуть задовольняти умові мінімуму деформації та ваги, необхідно апроксимувати отримані табличні дані формулами. На рис.3.35 представлена залежність деформації робочої поверхні дзеркала від товщини дзеркала при наявності вирізів полегшення шестикутної форми, яка була отримана в результаті розрахунку.

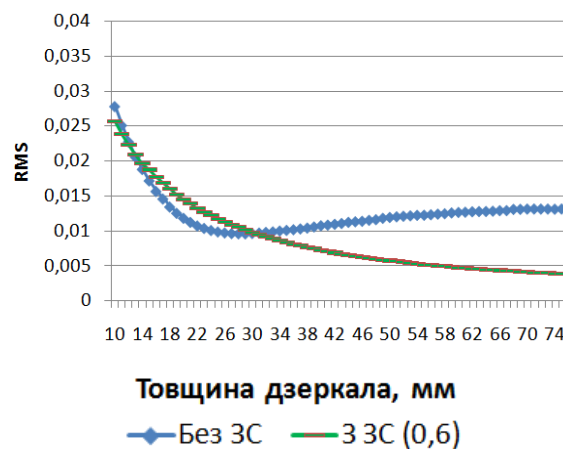


Рис.3.35. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від товщини дзеркала при використанні полегшення шестикутної форми

Апроксимація табличних даних здійснюється методом найменших квадратів у програмі MatLab. Після розрахунку коефіцієнтів, формули виглядають наступним чином:

- для варіанту без ЗС (рис. 3.35 а)

$$Deform = -2,3587 * 10^{-10} * Dt^5 + 6,143 * 10^{-8} * Dt^4 - 6,2667 * 10^{-6} * Dt^3 + 0,00031112 * Dt^2 - 0,0073767 * Dt + 0,07604$$

- для варіанту з ЗС (рис. 3.39б)

$$Deform_{BP} == -1,6326 * 10^{-7} * Dt^3 + 2,7646 * 10^{-5} * Dt^2 - 0,0016128 * Dt + 0,037591$$

На рис. 3.36 представлено графіки, які побудовано по табличним даним, та побудовані по отриманим формулам. Як видно з графіків, у межах табличних даних апроксимаційна крива добре повторює криву, що побудована по табличним даним.

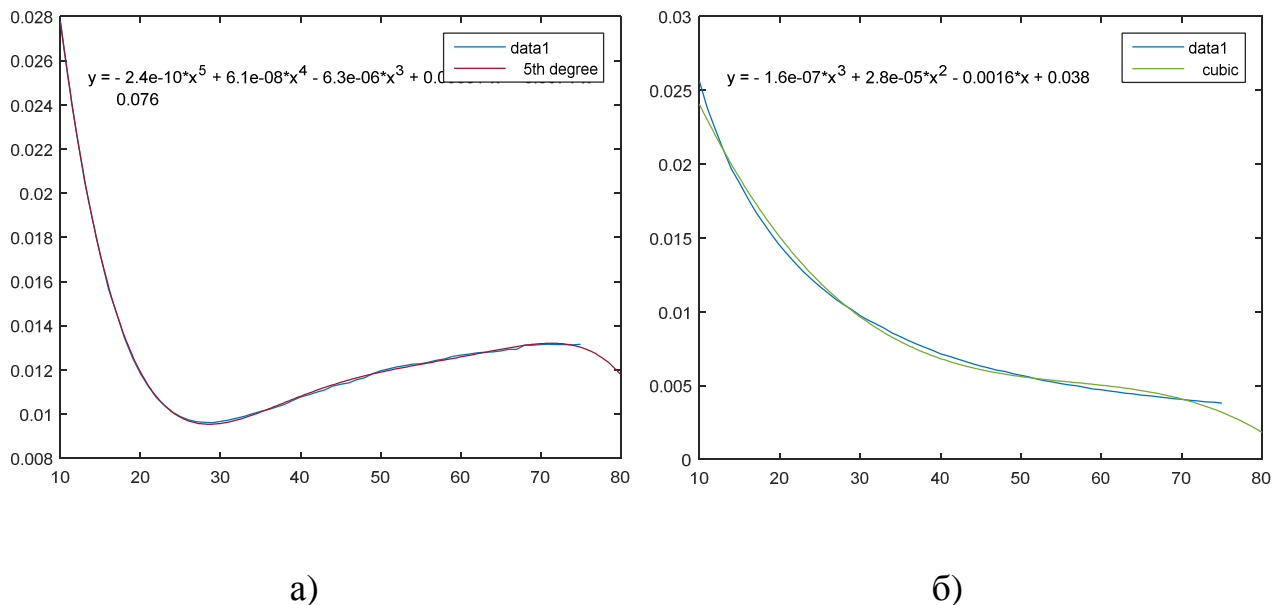


Рис. 3.36. Апроксимовані графіки: а) без ЗС, б) з ЗС

Далі наведені деякі апроксимаційні формули для варіанту дзеркала без задньої стінки:

- діаметр дзеркала:

$$Deform = 2,0148 * 10^{-9} * Dm^3 - 3,0113 * 10^{-6} * Dm^2 + 0,0015054 * Dm - 0,24204$$

- діаметр центрального отвору:

$$Deform = 1,4859 * 10^{-5} * Dch + 0,0059699$$

- радіус дзеркальної поверхні:

$$Deform = 2,6343 * 10^{-14} * Dr^4 - 1,628 * 10^{-10} * Dr^3 + 3,7869 * 10^{-7} * Dr^2 - 0,00039253 * Dr + 0,16122$$

- товщина ребер:

$$Deform = 2,1363 * 10^{-5} * Rt^4 - 0,00062234 * Rt^3 + 0,0066026 * Rt^2 - 0,029573 * Rt + 0,055735$$

- глибина отворів полегшення:

$$Deform = 2,3973 * 10^{-8} * Rd^4 - 2,3596 * 10^{-6} * Rd^3 + 5,1744 * 10^{-5} * Rd^2 + 7,5513 * 10^{-5} * Rd + 0,020509$$

- зовнішній діаметр отвору для кріплення:

$$Deform = 4,305 * 10^{-8} * Md1^4 - 8,8562 * 10^{-6} * Md1^3 + 0,00067151 * Md1^2 - 0,022311 * Md1 + 0,28286$$

- товщина стінок отвору для кріплення:

$$Deform = 5,1459 * 10^{-6} * Mt^3 - 3,6202 * 10^{-5} * Mt^2 + 0,00030918 * Mt + 0,0074227$$

- глибина отворів для кріплення:

$$Deform = 3,7301 * 10^{-5} * Md^2 - 0,0034667 * Md + 0,089227$$

Після апроксимації всіх даних та отримання залежностей можна визначати вплив кожного з параметрів на інші параметри та на деформацію дзеркальної поверхні.

За допомогою такого методу можна розрахувати такі геометричні параметри полегшення, при яких деформація буде мінімальною, а полегшення буде досягати 75-80%.

3.8. Висновки до розділу 3

1. Створено алгоритм дослідження параметрів полегшення на деформацію робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики, що дозволяє скоротити час на розробку полегшення дзеркал для конкретних систем;
2. Використовуючи запропоновані математичну модель визначення деформації та методику проведення дослідження, було вперше отримано комплекс залежностей деформації робочих поверхонь дзеркал вхідної оптики від геометричних параметрів їх полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики. Отримані залежності показали можливості для зменшення ваги та деформації робочих поверхонь дзеркал;
3. Дослідження кріплення дзеркала за циліндричну поверхню показало, що найбільше значення для зниження деформації робочої поверхні дзеркал є його положення відносно центра ваги – площина, в якій діє кріплення, має проходити через центр ваги дзеркала;
4. Проведене дослідження положення дзеркал відносно напрямку сили тяжіння. Сформовано рекомендації щодо вибору положення дзеркал відносно напрямку сили тяжіння, для мінімізації деформації їх робочих поверхонь, при здійсненні операцій контролю.
5. Проведене дослідження залежності деформації робочої поверхні дзеркал від їх форми, товщини та розмірів. Сформовано рекомендації стосовно того, яке полегшення можна застосовувати та яку товщину дзеркала вибрати при відомому діаметрі та формі дзеркала;
6. Використовуючи розроблені математичні моделі та методики, а також результати досліджень, можливо розрахувати такі геометричні параметри кріплення та полегшення, які дозволяють зменшити вагу будь-якого дзеркала на 60 – 80%.

РОЗДІЛ 4: ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЇ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЗЕРКАЛ ВХІДНОЇ ОПТИКИ ЗОБРАЖУЮЧОГО ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТРА НА ЯКІСТЬ ЗОБРАЖЕННЯ

4.1. Вихідні положення

Геометричні параметри полегшення та кріплення, конструкція полегшення, розмір та форма дзеркал впливають на деформацію робочої поверхні дзеркал. Чим більша ця деформація, тим більше спотворень буде вноситися у оптичну систему, а як наслідок буде зменшуватися якість зображення. Розглянемо, як впливають різні фактори на коефіцієнти Церніке, на які розкладається деформація робочої поверхні та як вони впливають на МПФ.

Також важливо експериментально перевірити роботу створеного алгоритму розрахунку деформацій робочих поверхонь дзеркал.

4.2. Вплив деформації робочої поверхні дзеркал на аберації у оптичній системі

Вплив деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики на аберації, що вносяться у оптичну систему є дуже важливий, так як вони спотворюють зображення, що буде створюватися. Дослідження проводилися для осесиметричних дзеркал та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал у два етапи:

1. вплив габаритних розмірів на аберації (розміри такі ж, як у розділі 3.7);
2. вплив зміщення кріплення відносно оптимального положення (розділ 3.5.1), так як не правильне положення вносить найбільшу деформацію робочої поверхні, а отже створює великі аберації.

Визначати аберації будемо по коефіцієнтам Церніке, якими, після розрахунків, описується деформація дзеркальної поверхні [71, 89, 90]. Як

було сказало у розділі 2.7, перші чотири коефіцієнти (C_0^0 , C_1^1 , C_1^{-1} та C_2^0) прибираються. З інших коефіцієнтів, які залишаються, будемо розглядати ті, які відповідають наступним абераціям:

- астигматизм 3-го порядку (C_2^{-2} , C_2^2);
- кома 3-го порядку (C_3^{-1} , C_3^1);
- сферична аберація 3-го порядку (C_4^0);
- астигматизм 5-го порядку (C_4^{-2} , C_4^2);
- кома 5-го порядку (C_5^{-1} , C_5^1);
- сферична аберація 5-го порядку (C_6^0).

Далі розглянемо тільки ті з них, які впливають найбільше. У Додатку Г буде наведено у табличному вигляді всі 36 коефіцієнтів Церніке для першого етапу розрахунку (габаритні розміри).

Осесиметричні дзеркала

Для даного дослідження використовуються дзеркала з отворами у ЗС з такими діаметрами: 650мм, 550 мм, 450 мм та 350мм. Всі дзеркала мають центральний отвір, діаметр якого складає 30% від діаметра дзеркала. Дослідження проводилися для кожного дзеркала при шести значеннях товщини дзеркала: 30, 38, 46, 55, 64 та 70 мм при оптимальному положенні кріплення.

Дослідження показали, що для осесиметричних дзеркал найбільший вплив мають такі коефіцієнти: C_2^2 , C_3^{-1} , C_4^0 , C_4^2 , C_5^{-1} та C_6^0 (рис.4.1). Значення деформацій приводяться на рис.3.28 - 3.33.

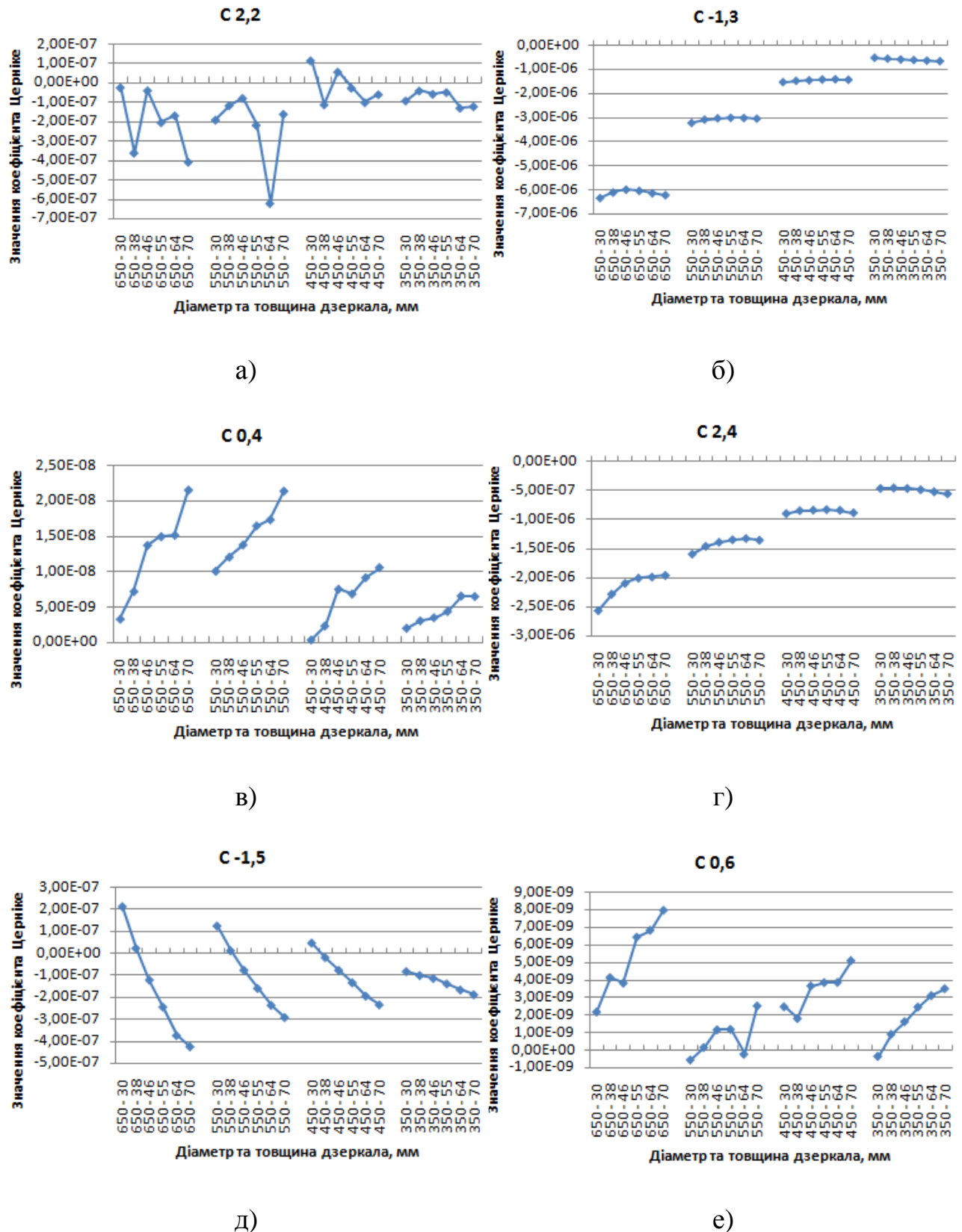


Рис.4.1. Залежність значень коефіцієнтів Церніке від діаметра та товщини осесиметричних дзеркал: а) $C_{2,2}^2$, б) $C_{-1,3}^{-1}$, в) $C_{4,0}^0$, г) $C_{4,2}^2$, д) $C_{5,1}^{-1}$, е) $C_{6,0}^0$

Як видно з графіків, приведених на рис.4.1, найбільше значення на деформацію має кома 3-го порядку та астигматизм 5-го. Астигматизм 3-го порядку виникає, однак залежності від діаметра та товщини дзеркала не має. Значення астигматизму 5-го порядку майже однакове та не залежить від геометричних параметрів дзеркала. Для дзеркал з великим діаметром можна знайти таку товщину, при якій значення коми 3-го порядку буде мінімальним; при зменшенні діаметра кома діє однаково при будь-яких значеннях товщини. Кома 5-го порядку при збільшенні товщини дзеркала зменшується та змінює знак на протилежний. Сферична аберация 3-го та 5-го порядків збільшується при збільшенні товщини дзеркал.

Як було показано раніше, зміщення кріплення від оптимального положення призводить до різкого збільшення деформації робочої поверхні дзеркала (рис.4.2.). Розглянемо зміну значень коефіцієнтів Церніке при цьому для дзеркала діаметром 550 мм та товщиною 55 мм (рис.4.3).



Рис. 4.2. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від зміщення кріплення від оптимального положення

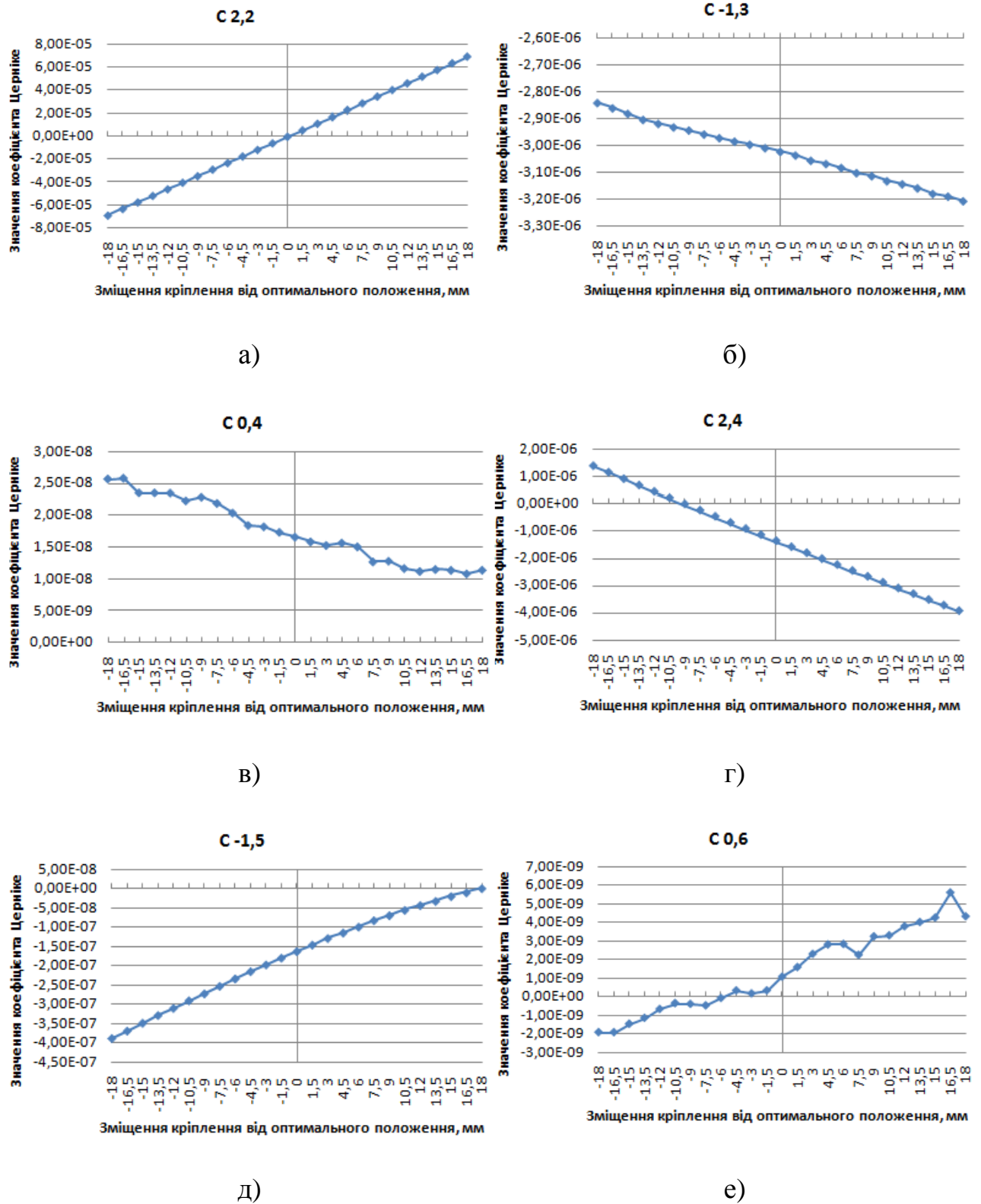


Рис.4.3. Залежність значень коефіцієнтів Церніке від зміщення кріплення від оптимального положення для осесиметричного дзеркала: а) $C_{2,2}^2$, б) $C_{3^{-1}}^{-1}$, в) C_4^0 , г) $C_{4,2}^2$, д) $C_{5^{-1}}^{-1}$, е) C_6^0 .

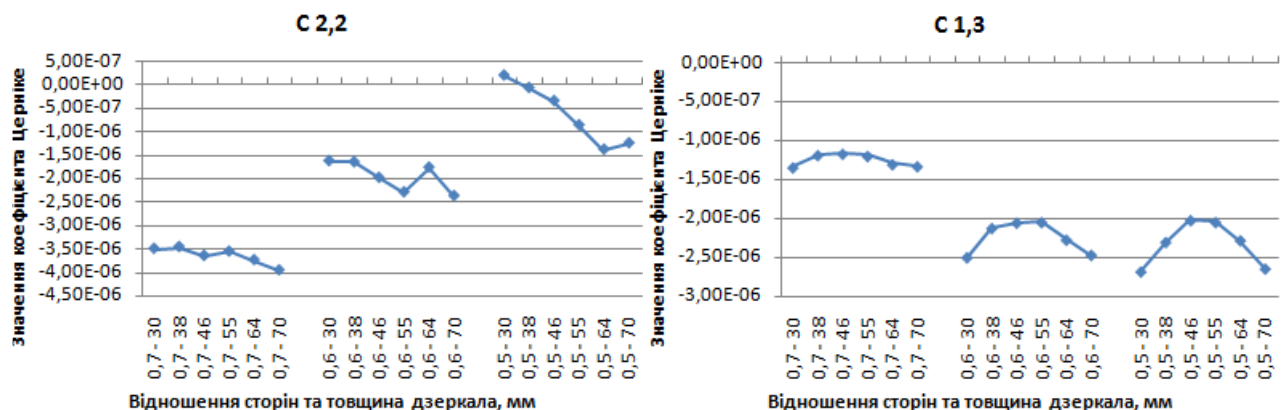
Як видно з графіків на рис.4.3, найбільше значення на деформацію має коефіцієнт C_2^2 , який відповідає за астигматизм 3-го порядку - при оптимальному положенні кріплення він зменшується майже до нуля.

Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал

Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал у цьому дослідженні були обрані без ЗС. Розміри дзеркал наступні: більший розмір 400 мм, менший розмір 280мм (відношення меншої сторони до більшої 0,7), 240 мм (0,6), та 200 мм (0,5).

Дослідження показали, що для позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал найбільший вплив мають такі коефіцієнти: C_2^2 , C_3^1 , C_4^0 , C_4^2 , C_5^1 та C_6^0 (рис.4.4). Значення деформацій приводяться на рис.3.34 - 3.37.

Як видно з графіків, приведених на рис.4.4, найбільше значення на деформацію має сферична аберація 3-го порядку, в меншій мірі впливає кома 5-го порядку. Інші коефіцієнти майже не впливають на деформацію робочої поверхні.



а)

б)

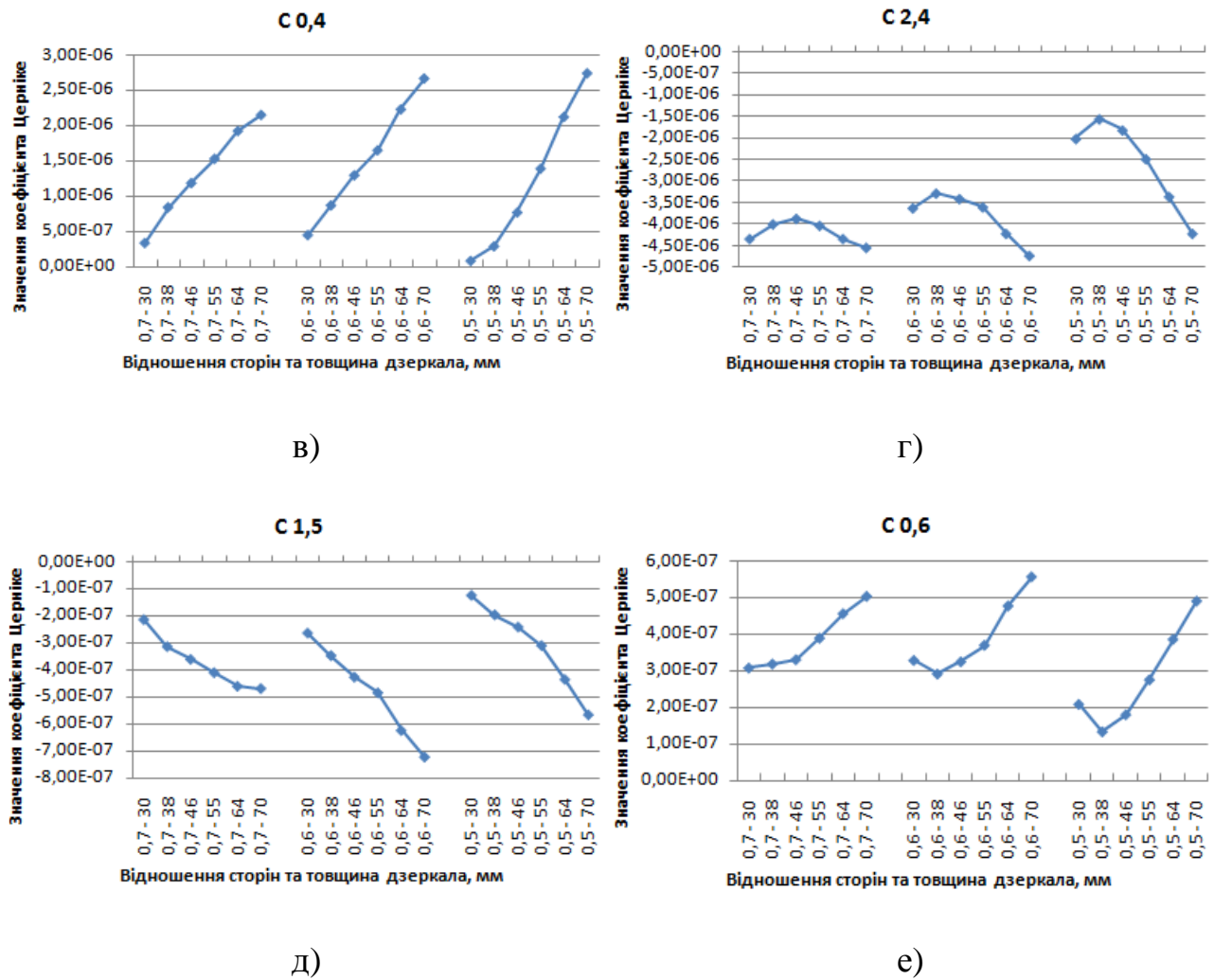


Рис.4.4. Залежність значень коефіцієнтів Церніке від діаметра та товщини позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал: а) C_2^2 , б) C_3^1 , в) C_4^0 , г) C_4^2 , д) C_5^1 , е) C_6^0

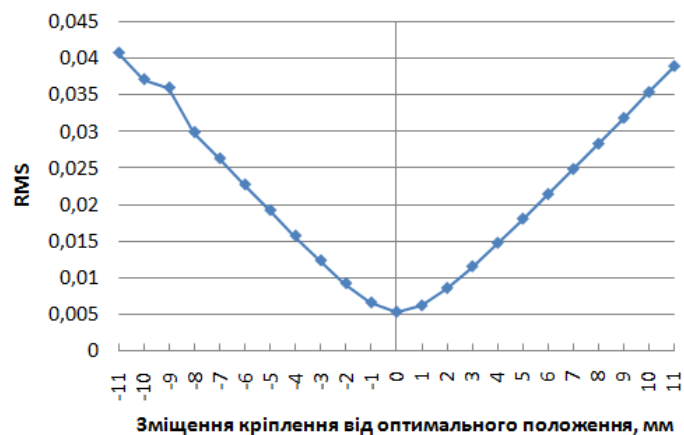
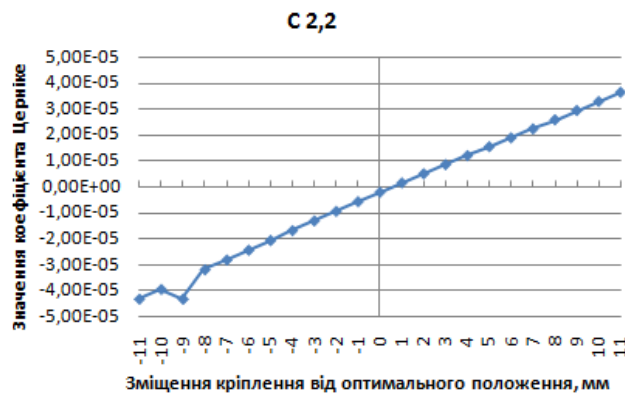
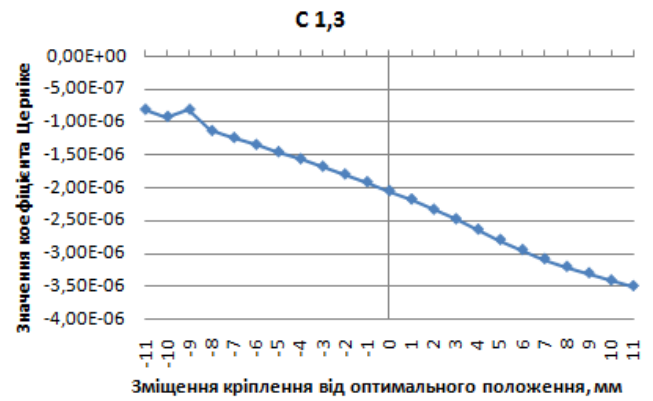


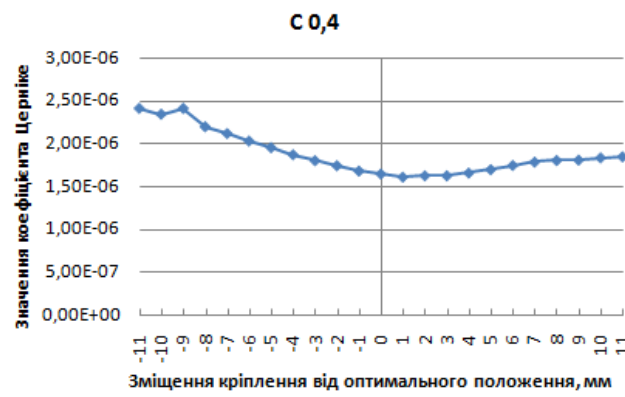
Рис. 4.5. Залежність деформації робочої поверхні дзеркала від зміщення кріплення від оптимального положення



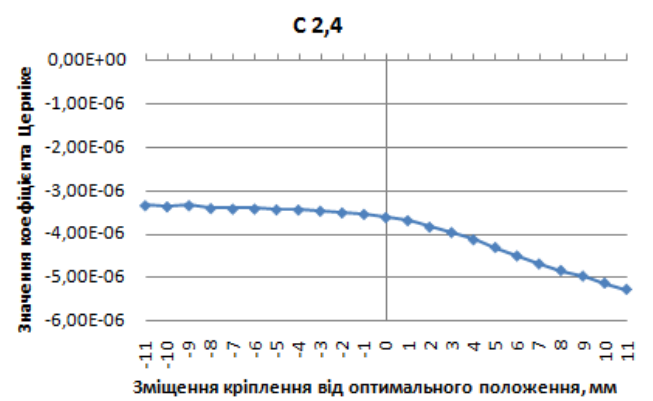
а)



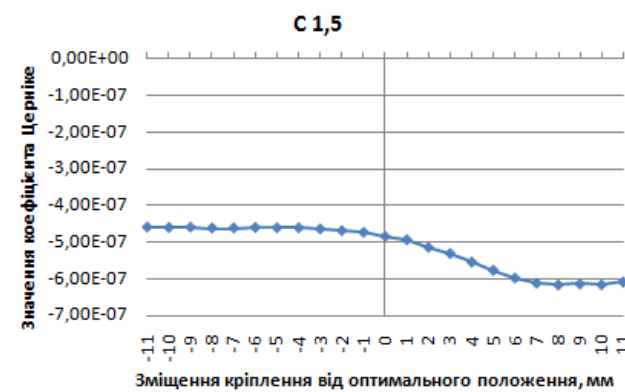
б)



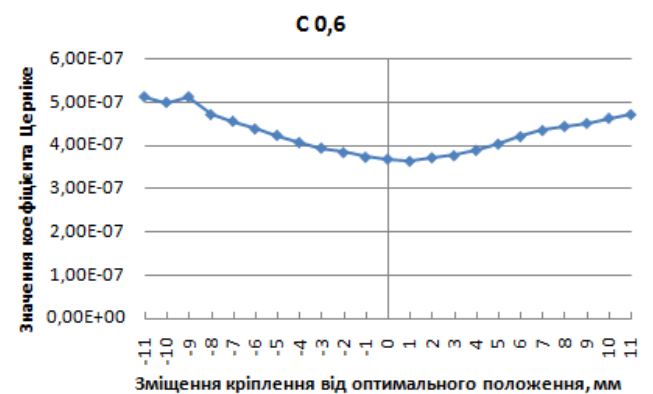
в)



г)



д)



е)

Рис.4.6. Залежність значень коефіцієнтів Церніке від зміщення кріплення від оптимального положення для позаосьового сегмента осесиметричного дзеркала: а) C_2^2 , б) C_3^1 , в) C_4^0 , г) C_4^2 , д) C_5^1 , е) C_6^0 .

Як видно з графіків на рис.4.6, так само, як і для осесиметричних дзеркал, найбільше значення на деформацію має коефіцієнт C_2^2 , який відповідає за астигматизм 3-го порядку - при оптимальному положенні кріплення він зменшується майже до нуля.

4.3. Вплив деформації робочої поверхні дзеркал на модуляційно-передавальну функцію конкретної системи

Для дослідження впливу деформації робочої поверхні дзеркал на МПФ (модуляційно-передавальну функцію) в якості вхідного об'єктива ЗФС застосуємо тридзеркальний анастигматичний квазіортоскопічний об'єктив [91 – 94], який побудований по принципу умовно-децентрованого об'єктива, в якому використовується позаосьове щілинне поле зору. Завдяки цьому система не має екранування, а щілинне поле добре погоджується з ПЗЗ-лінійками, які використовуються у ЗФС статичного типу при "pushbroom" скануванні. Оптична схема такого об'єктива показана на рис.4.7 та має два позаосьових сегменти осесиметричних дзеркал (поз.1 та 3) та одне осесиметричне дзеркало (поз.2). МПФ ідеального тридзеркального об'єктива представлена на рис.4.8.

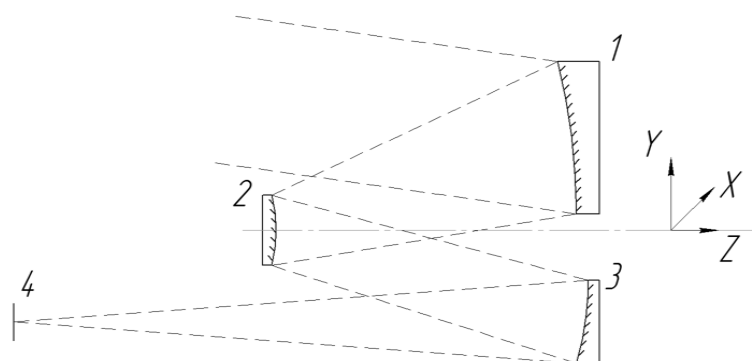


Рис.4.7. Оптична схема тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктиву

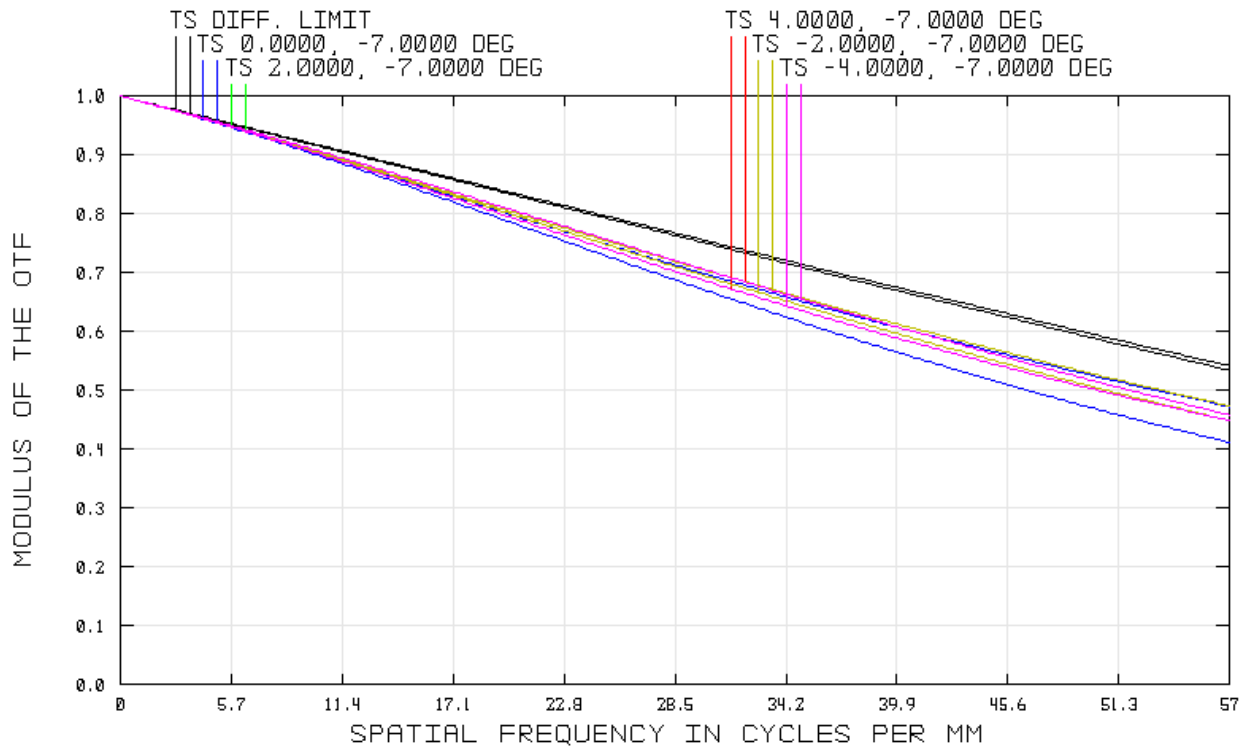


Рис.4.8. МПФ ідеального тридзеркального об'єктива

На рис.4.9. представлена МПФ об'єктива, в якому ідеальні поверхні дзеркал замінені на деформовані під дією сили тяжіння. Дзеркала мають полегшення у 70 %. Значення деформації робочої поверхні дзеркал наступні:

1. перше дзеркало: $0,005474\lambda$;
2. друге дзеркало: $0,00062\lambda$;
3. третє дзеркало: $0,002152\lambda$.

Як видно з графіків МПФ на рис.4.8 та 4.9, дзеркала під дією сили тяжіння з розрахованим за допомогою розроблених методів та алгоритмів полегшенням (близько 70 %, 30% ваги дзеркал залишилося) майже не знижують МПФ.

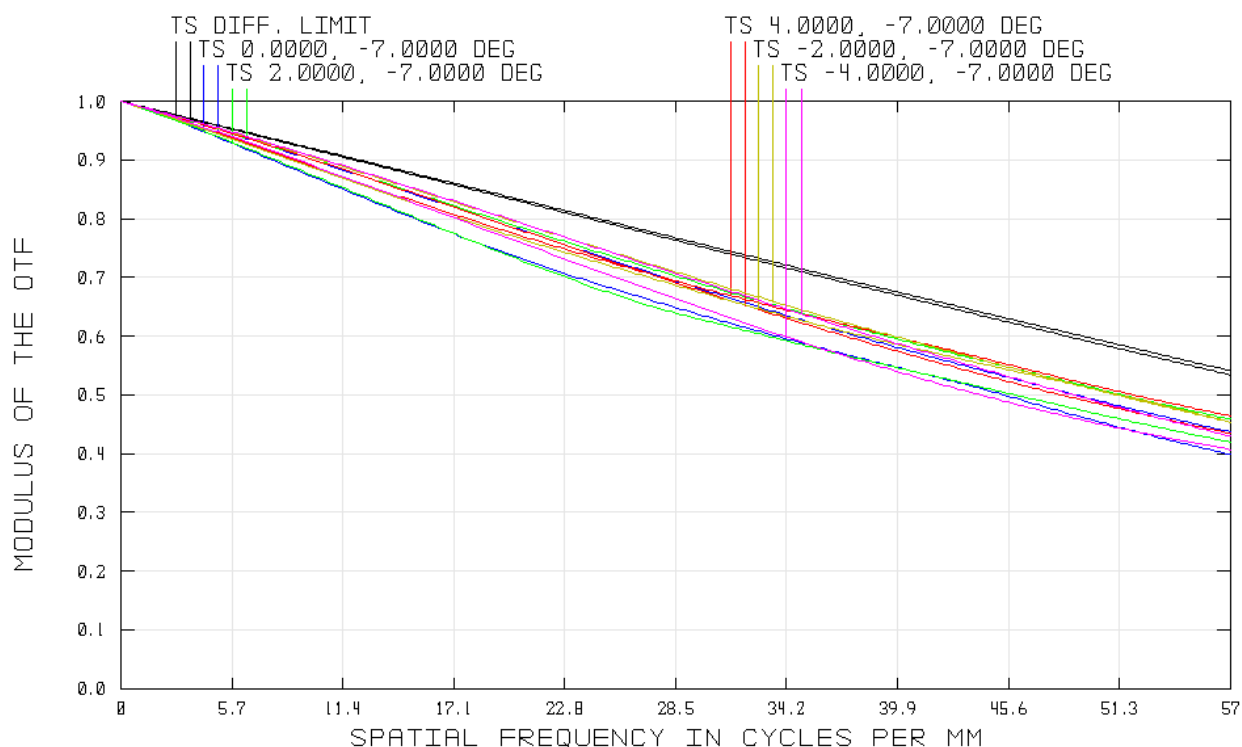


Рис.4.9. МПФ об'єктива з полегшенням та під дією сили тяжіння

Далі розглянемо залежність падіння МПФ від зсуву кріплення від оптимального положення. Дане дослідження проводиться тільки для зсуву кріплення для першого дзеркала. Інші дзеркала представлені ідеальними поверхнями. На рис.4.5 представлена деформація робочої поверхні дзеркала, яка виникає при зміщенні кріплення.

На рис. 4.9. представлена МПФ об'єктива при максимальному зсуві, що розглядається (13 мм).

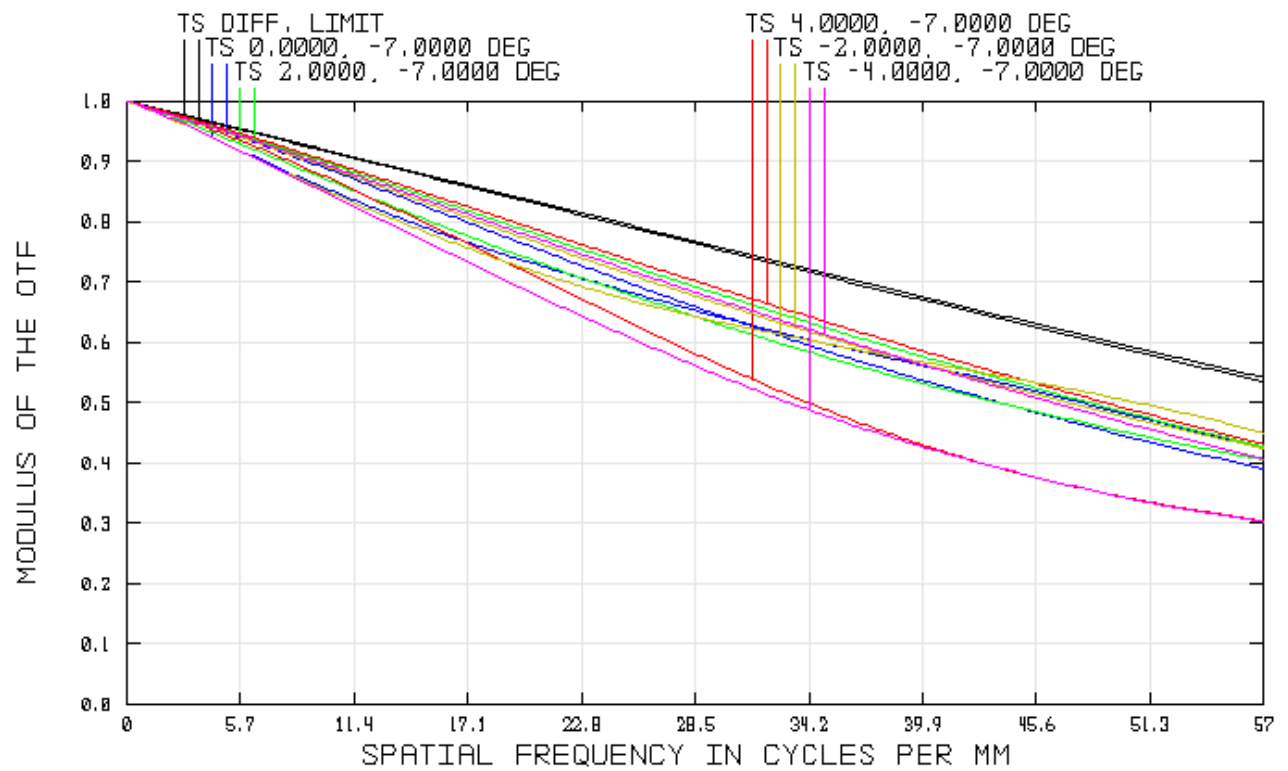


Рис. 4.9. МПФ об'єктива з зсунутим кріпленням першого дзеркала (на 13 мм від оптимального положення)

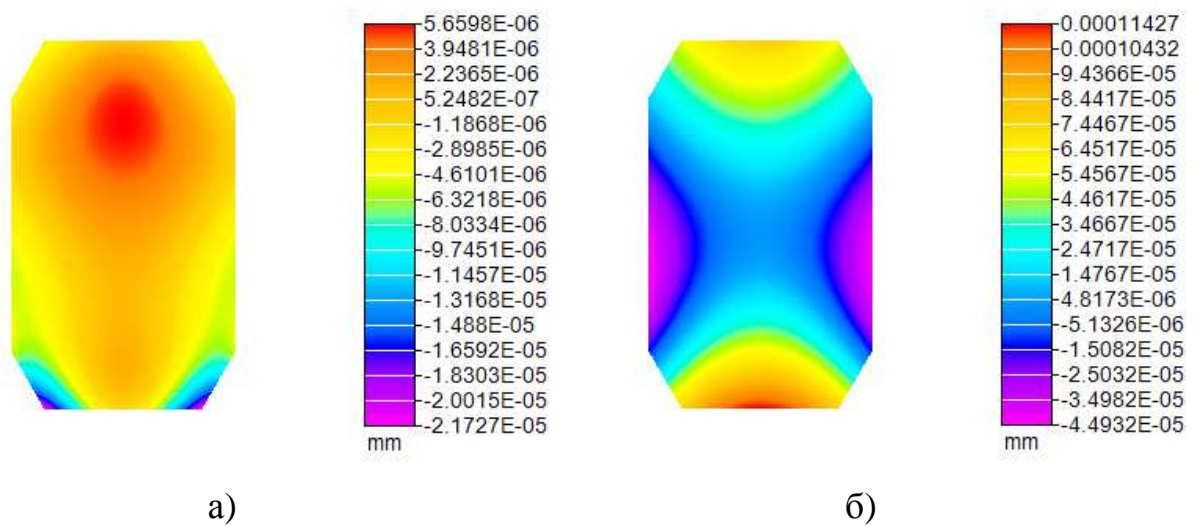


Рис.4.10. Деформація дзеркальної поверхні: а) оптимальне положення кріплення, б) максимальний зсув кріплення, який розглядається (13 мм)

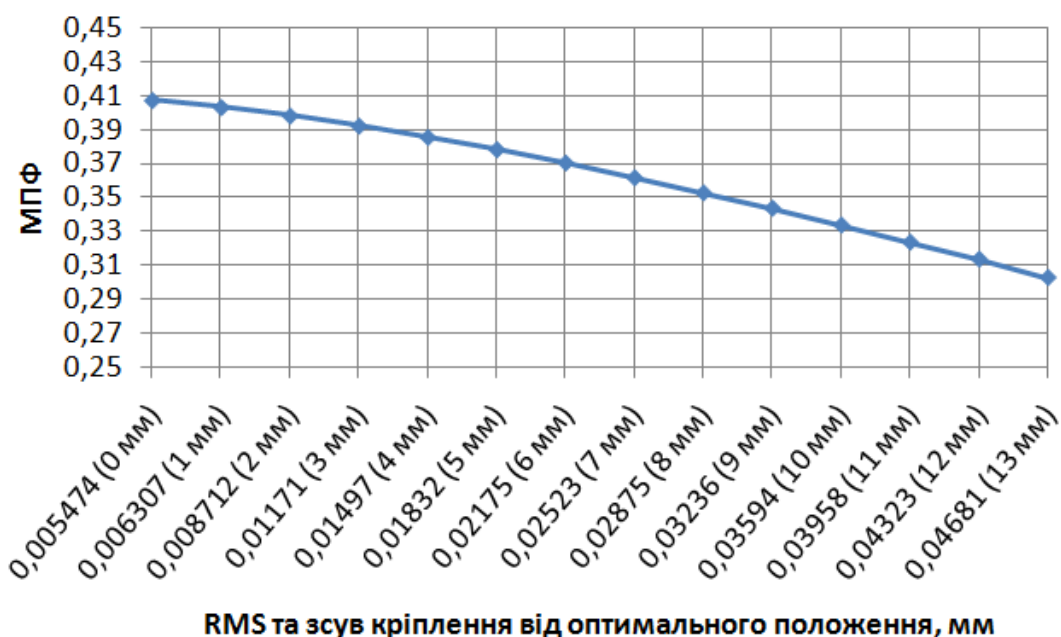


Рис.4.11. Залежність падіння МПФ об'єктива від деформації робочої поверхні першого дзеркала, яка збільшується в наслідок зсуву кріплення від оптимального положення

На рис.4.10 представлено деформацію робочої поверхні першого дзеркала об'єктиву при оптимальному положенні кріплення (значення деформації - $0,005474\lambda$) та при зсунутому кріпленні на 13 мм (значення деформації - $0,04681\lambda$). Як видно з рисунка, деформація при зсуві кріплення значно збільшується. На рис.4.11 представлено падіння МПФ об'єктива при такому зсуві. З графіка видно, що при збільшенні деформації у 2 рази МПФ падає на 0,02, при збільшенні деформації у 7 разів МПФ падає на 0,09. Це дуже велике падіння, так як при даному дослідженні береться до уваги тільки деформація робочої поверхні першого дзеркала. Деформації інших дзеркал, а також інші похибки, які можуть впливати на МПФ (нахили, зміщення, повороти, ...) не враховуються.

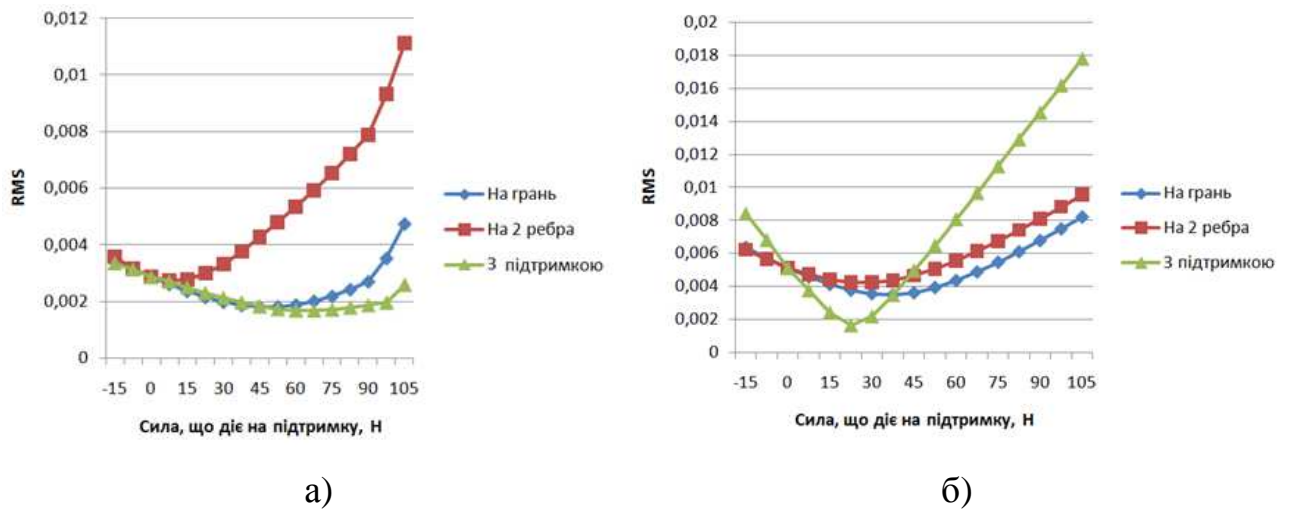


Рис.4.13. Залежність деформації дзеркальної поверхні від сили, що діє на підтримку для двох дзеркал: а) вагою 9 кг, б) вагою 4 кг

З графіків, представлених на рис.4.13 видно, що найкращим варіантом прикладання сил є варіант з квадратною підтримкою. Такий варіант дозволяє зменшити значення деформації у 2-3 рази. Як показали дослідження, для максимального зменшення значення деформації на підтримку необхідно прикладати силу, що дорівнює приблизно 0,5-0,6 від ваги дзеркала.

4.5. Експериментальна перевірка роботи розробленого алгоритму розрахунку деформацій

Експериментальна перевірка роботи методу розрахунку деформацій здійснювалася за допомогою схеми, модель головного компонента якої представлений на рис.4.14. Даний компонент складається з підтримки (поз. 1), на якій встановлено опукло - увігнута лінзу діаметром 50 мм. Сила тяжіння (А) діє у площині рисунка вниз. На лінзу зверху поставлений вантаж масою 1 кг (В). Після цього за допомогою інтерферометра визначається деформація опуклої поверхні. Зображення деформації опуклої поверхні лінзи, що отримано після обробки експериментальних даних та після розрахунку розробленим методом представлено на рис.4.15.

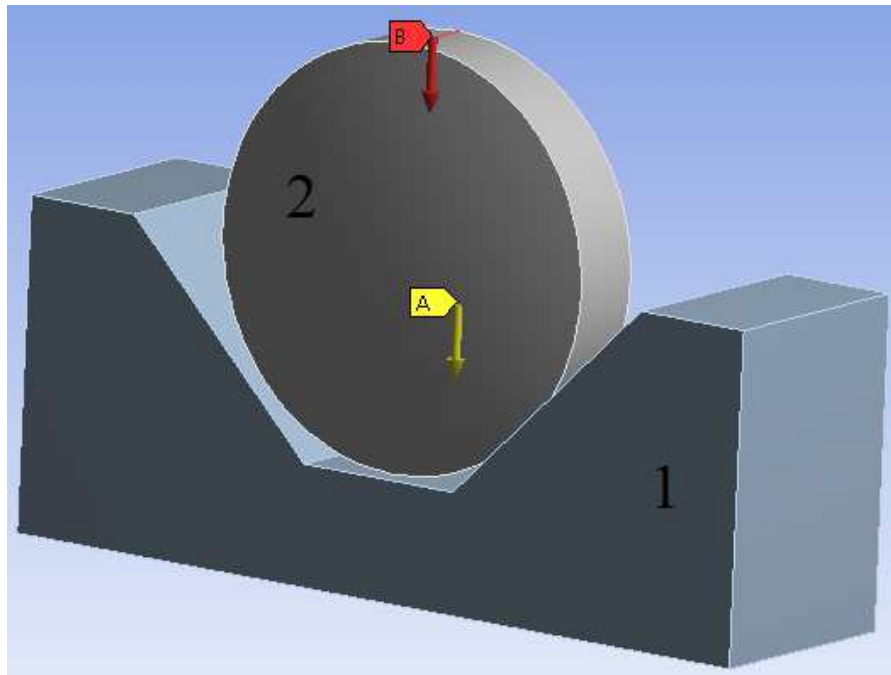
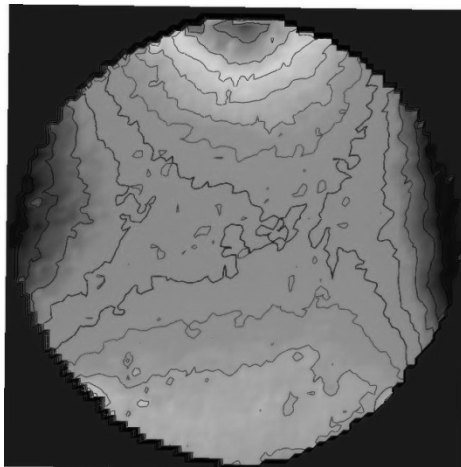
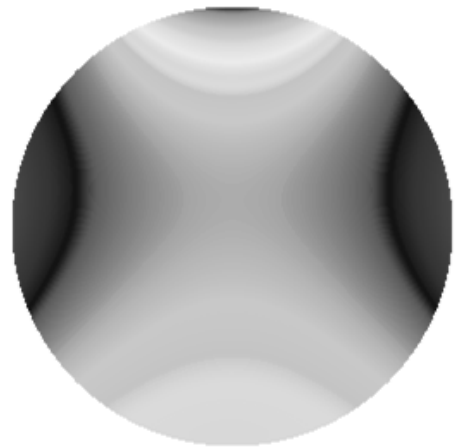


Рис.4.14. Модель головного компонента схеми



а)



б)

Рис.4.15. Зображення опуклої поверхні лінзи під дією ваги вантажу: а) отримане по експериментальним даним, б) отримане після розрахунку розробленим методом

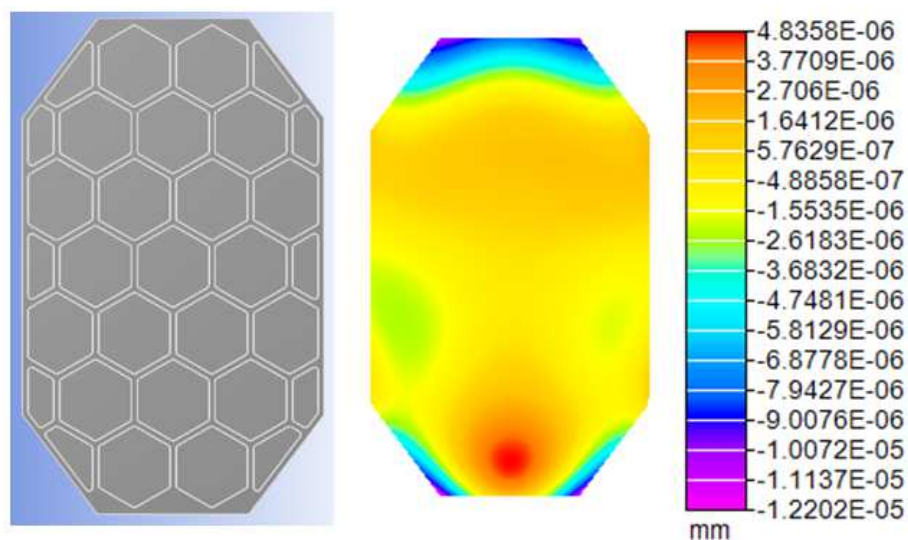
Таблиця 4.1. Результати експерименту та моделювання

	Експеримент	Моделювання
Всі коефіцієнти Церніке, λ	0,16344	0,1371
Без 4-х перших коефіцієнтів Церніке, λ	0,025439	0,02313

Як видно з даних, наведених у таблиці 4.1, дані, що отримані при комп'ютерному моделюванні з подальшим розрахунком значення деформації розробленим алгоритмом майже співпадають з даними, що отримані експериментально.

4.6. Розрахунокполегшення дзеркал для конкретної системи

Використовуючи всі розроблені алгоритми та результати отриманих досліджень, розроблялося полегшення дзеркал для конкретної системи вхідної оптики. В результаті вдалося розробити таку конструкцію їх полегшення, яка дозволяє знизити вагу першого дзеркала на 70 % (з 14 до 4 кг), другого дзеркала на 65% (з 6 до 2 кг). На рис.4.16 наведено моделі полегшення першого та другого дзеркал, а також деформацію робочої поверхні дзеркала, розраховану створеними алгоритмами.



a)

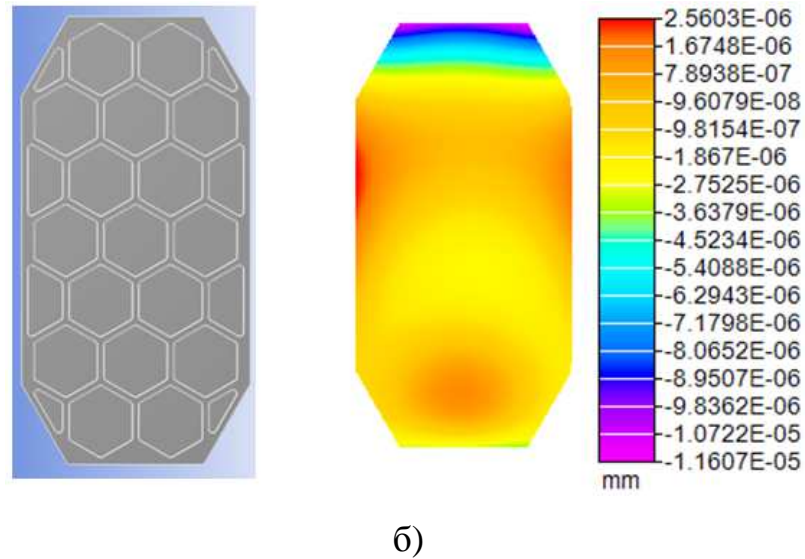


Рис.4.16. Модель полегшення дзеркала та деформація його робочої поверхні:

а) для першого дзеркала, б) для другого дзеркала

При такому полегшенні деформація робочої поверхні під дією сили тяжіння для першого дзеркала складає $0,00349\lambda$ (2,42 нм), для другого – $0,00328\lambda$ (2,27 нм), тобто деформація є такою, що не впливає на якість створюваного об'єктивом зображення у земних умовах.

4.7. Висновки до розділу 4

1. Визначено, на які коефіцієнти Церніке впливають деформації робочої поверхні дзеркал різних форм та розмірів та при не оптимальному положенні кріплення. Визначено, що найбільший вплив на якість зображення має не оптимальне положення дзеркала у кріплення. При цьому до оптичної системи вноситься астигматизм третього порядку;
2. Для дуже великих позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал (з великою стороною більше 0,5 м), у яких наявна значна деформація навіть при правильному розрахунку та положенні кріплення, для її зменшення можна застосувати запропонований метод зменшення деформації, що базується на використанні спеціальної конструкції підтримки. Використанні такої підтримки дозволяє зменшити деформацію дзеркал у 2 – 3 рази у порівнянні з системою без підтримок;
3. Експериментальна перевірка роботи математичної моделі для визначення деформацій робочих поверхонь оптичних елементів показала збіг експериментальних даних та даних, отриманих при комп'ютерному моделюванні та розрахунку запропонованою моделлю;
4. На базі тридзеркального анастигматичного квазіортоскопічного об'єктиву було проведено дослідження впливу деформацій на якість отриманого зображення, що показало наступне:
 - а. за допомогою запропонованої математичної моделі для визначення деформації робочих поверхонь та методики проведення дослідження полегшення дзеркал можна розрахувати таку конструкцію полегшення, яка не буде збільшувати деформацію робочої поверхні дзеркала (тобто не буде

призводити до падіння МПФ, однак вагу дзеркал при цьому вдається значно зменшити;

б. при зсуві кріплення для першого дзеркала тридзеркального об'єктива деформація збільшується та призводить до падіння МПФ;

5. Використовуючи всі розроблені математичні моделі, методики та результати досліджень, було розроблено структуру полегшення для двох позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал. Для них полегшення склало 70 %, а використання їх у оптичній схемі вхідної оптики ЗФС не призвело до падіння МПФ системи.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена наукова задача забезпечення високої якості форми робочих поверхонь вхідної оптики ЗФС при зменшенні ваги її дзеркал.

При виконанні дисертаційної роботи здобувачем були отримані такі наукові результати:

1. Порівняльний аналіз оптичних схем сучасних ЗФС космічного базування показав, що найбільшим компонентом системи, який присутній у всіх видах ЗФС, є вхідна оптики. При збільшенні роздільної здатності системи необхідно значно збільшувати її апертуру, що призводить до значного зростання ваги системи в цілому.
2. Дослідження математичної моделі ЗФС показало, що вхідна оптика, при зміщенні, нахилах або деформаціям компонентів вносить набагато більше спотворень у створюване системою зображення.
3. Розроблено математичну модель визначення деформації робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС під дією зовнішніх факторів (температури, сили тяжіння, інших сил та навантажень), на базі математичної моделі створена програма у пакеті MatLab. Такий алгоритм відрізняється від відомих ширшою областю застосування (можливістю розрахунку деформації як круглих поверхонь, так і інших будь-якої форми) та швидшою обробкою результатів при оптимізації великої кількості параметрів, він допомагає скоротити час та вартість, що необхідні на розробку конструкції вхідної оптики з мінімумом деформацій.
4. Розроблено методику проведення комплексного дослідження впливу зовнішніх факторів (температур, сили тяжіння, інших сил та навантажень), а також геометричних розмірів полегшення та кріплення на деформацію робочої поверхні дзеркал вхідної оптики ЗФС. Дана методика проведення дослідження, в комплексі з математичною

моделлю розрахунку деформацій, може бути застосований для розрахунку деформацій будь-яких оптичних компонентів (дзеркал, лінз, призм і т.д. з механічними деталями корпусу чи без них) під дією будь-яких механічних або температурних факторів зовнішнього середовища. Використання даного методу дозволяє значно зменшити кількість натурних випробувань та дозволяє передбачити поведінку оптичної системи під дією температурних та механічних навантажень.

5. Проведене комплексне дослідження впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення, їх типів, розмірів та типів дзеркал вхідної оптики на деформацію їх робочої поверхні показало можливості для зменшення ваги дзеркал та деформації їх робочих поверхонь. Використовуючи розроблені математичні моделі та методики можливо розрахувати такі геометричні параметри кріплення та полегшення, які дозволяють зменшити вагу дзеркала на 60 – 80%. При цьому МПФ системи не змінюється.
6. Результати експериментальних досліджень підтверджують правильність роботи розробленої математичної моделі визначення деформації оптичних поверхонь під дією факторів зовнішнього середовища.
7. Отримані результати впроваджені у КП СПБ «Арсенал» при проектуванні та створенні полегшених дзеркал сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) та надвисокої роздільної здатності (СНВРЗ), що підтверджується актом впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попов М. О. Можливості та перспективи космічних систем видової розвідки і спостереження в контексті національних інтересів / М. О. Попов, Є. І. Махонін, В. І. Присяжнюк. // Наука і оборона. – 2008. – №2. – С. 41–52.
2. Досягнення і проблеми розвитку аерокосмічних оптико-електронних сенсорів ДЗЗ / М. О.Попов, М. І. Лихоліт, В. В. Полежаев, В. В. Станкевич. // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки України: матеріали допов. всеукраїнської конференції. – 2008. – С. 23–26.
3. Мосов С. П. Перспективы систем дистанционного зондирования земли из космоса двойного назначения [Електронний ресурс] / С. П. Мосов. – 2001. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.space.com.ua/gateway/news.nsf/NewsALLR/FB7C3DD172EF446BC3256BF100493560!open>.
4. LandSat [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://landsat.usgs.gov>.
5. Лялько В. І. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / В. І. Лялько, М. О. Попов. – Київ: Наукова думка, 2006. – 360 с.
6. Arnold R. H. Interpretation of Airphotos and Remotely Sensed Imagery / R. H. Arnold. – N.Y.: Prentice Hall, 1996. – 262 с.
7. Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (Hico) – A New view of the Coastal Zone from the International Space Station [Електронний ресурс] / [М. R. Corson, R. L. Lucke, С. О. Davis та ін.] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/267724400_The_Hyperspectral_Imager_for_the_Coastal_Ocean_HICO_-_A_New_View_of_the_Coastal_Zone_from_the_International_Space_Station.

8. Використання супутникових даних в інтересах оцінки пожежної обстановки при бойовому застосуванні повітряних сил збройних сил України / [Д. А. Гриб, Г. В. Худов, О. М. Маковейчук та ін.]. // Системи озброєння та військової техніки. – 2010. – №3. – С. 176–179.
9. Жолобак Г. М. Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України / Г. М. Жолобак. // Космічна наука і технологія. – 2010. – №3. – С. 46–54.
10. The Future of Imaging Spectroscopy – Prospective Technologies and Applications / [M. E. Schaepman, R. O. Green, S. G. Ingar та ін.]. // Proceedings of IGARSS 2006 and 27th Canadian Symposium on Remote Sensing, Denver. – 2006. – С. 205–209.
11. Ferrec Y. Spectro-imagerie aéroportée par transformation de Fourier avec un interféromètre statique à décalage latéral: réalisation et mise en oeuvre: these pour obtenir le grade de Docteur en Sciences [Електронний ресурс] / Yann Ferrec // Université Paris-Sud XI.. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/35/71/22/PDF/these_Ferrec.pdf.
12. Горбунов Г. Г. Фурье-спектровизоры / Г. Г. Горбунов. // Гиперспектральные приборы и технологии: тезы докладов научно-технической конференции, Красногорск. – 2013. – С. 73–74.
13. Артюхина Н. К. Математическая модель функционирования Фурье - видеоспектрометра / Н. К. Артюхина, Т. В. Климович, М. Н. Котов. // Вісник НТУУ "КПІ". – 2013. – №43. – С. 35–46.
14. Интерференционный спектрометр [Електронний ресурс] / [Г. М. Грязнов, Л. В. Егорова, В. Д. Стариченкова та ін.] // Пат. 2313070 Российская Федерация, МПК G01J3/45,G01B9/02 – Режим доступу до ресурсу: freepatent.ru/patents/2313070.
15. The design of an airborne Fourier transform visible hyperspectral imaging system for light aircraft environmental remote sensing / [J. O. Leonardo, E. W. Butler, B. Rafert та ін.]. // Imaging Spectrometry, Proc.SPIE 2480. – 1995.

16. MightySatII.1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/MighteSatII.1>.
17. Lucey P. G. SMIFTS: A cryogenically-cooled spatially-modulated imaging infrared interferometer spectrometer / Paul G. Lucey. // *Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment, Proc.SPIE* 1937. – 1993.
18. HawaiiSat-1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/HawaiiSat-1>.
19. A low cost thermal infrared hyperspectral imager for small satellites / [S. T. Crites, P. G. Lucey, R. Wright та ін.]. // *Sensors and Systems for Space Applications, Proc.SPIE* 8044. – 2011.
20. Tingkui M. Analysis of a moderate resolution Fourier transform imaging spectrometer / M. Tingkui, Z. Chunmin, Z. Daochang. // *Optics Communication*. – 2009. – №282. – С. 1699–1705.
21. Harvey A. R. Birefringent Fourier - transform imaging spectrometer [Електронний ресурс] / A. R. Harvey, D. W. Fletcher-Holmes // *Optical Express*. – Vol 12, Issue 22. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-12-22-5368>.
22. Modeling of the temporally and spatially modulates Fourier transform imaging spectrometer working in orbit / Y.Yan, Z. Xiubao, S. Chengming, Z. Zhiliang. // *Optic*. – 2011. – №122. – С. 1576–1583.
23. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // *Космічна наука і технологія*. – 2014. – Т. 20, № 5 (90). – С. 35-40.
24. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і*

- перспективи», 23-24 квітня 2014. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 64-65.
25. Pozdniakov D.V. Optical systems of fourier transform imaging spectrometer for remote sensing / D.V. Pozdniakov, V.G. Kolobrodov // Scientific works of 15th International young scientists conference «Optics and high technology material science», October 23-26, 2014. – Kyiv: Taras Shevchenko national university of Kyiv. – 2014. - P.173.
 26. Попов М. О. Аналіз можливостей застосування перспективного супутникового відео спектрометра оптичного діапазону при вирішенні типових тематичних задач дистанційного зондування землі : звіт про НДР / М. О. Попов. – Київ, 2008. – 100 с. – (Інв. № 0108U005297).
 27. State of the art of remote sensing and GIS applied to environmental studies related to mining activities [Електронний ресурс] // IST-1999-10337. – 1999. – Режим доступу до ресурсу: <http://www2.brgm.fr/mineo/UserNeed/remote%20sensing.pdf>.
 28. Earth Observation History on Technology Introduction [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.eoportal.org/documents/kramer/History.pdf.
 29. Сенсори на космічному апараті EO-1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/eo-1>.
 30. Сенсори на космічному апараті PROBA-1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/proba-1>.
 31. Сенсори на космічному апараті MightySat II.1 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/MighteSat II.1](https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/MighteSat%20II.1).

32. Архипов С. А. Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП» / С. А. Архипов, В. М. Линько, Е. Л. Лукашевич. – Москва, 2008. – 9 с.
33. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли [Электронный ресурс] / [Ф. С. Зевелевич, Ю. М. Головин, А. В. Десятова и др.] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-224-230.pdf>.
34. Imaging Spaceborn and Airborne Sensor System in the Beginning of the Next Century / J.Nieke, H. Schwarzer, F. Neumann, G. Zimmermann. // Proc. of SPIE. – 1997. – №3221. – С. 581–592.
35. Савицкий А. М. Оптические системы объективов для малых космических аппаратов / А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский. // Оптический журнал. – 2009. – №76. – С. 83–88.
36. Колобродов В. Г. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / В. Г. Колобродов, П. В. Бородийчук, В. И. Микитенко. // Космічна наука і технологія. – 1998. – Т.4, №1. – С. 29–38.
37. Vukobratovich D. Lightweight Mirror Design, Optomechanical Engineering Handbook / D. Vukobratovich., 1999. – 41 с.
38. Савицкий А. М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А. М. Савицкий, И. М. Соколов. // Оптический журнал. – 2009. – №76. – С. 94–98.
39. Kihm Hagyong Development of 1-m Primary mirror for a Spaceborne Camera / Hagyong Kihm, Ho-Soon Yang, Hyug-Gyo Rhee, Yum-Woo Lee // Proc. of SPIE Vol. 9573 0W. – 2015. – P. 1–6.
40. Kihm Hagyong Adjustable bipod flexures for mounting mirrors in a space telescope / Hagyong Kihm, Ho-Soon Yang, Il Kweon Moon, Jeong-Heum Yeon // Applied Optics. - Vol.51, №32. - 2012. - P. 7776-7783.
41. Kihm Hagyong Design optimization of a 1-m lightweight mirror for a space telescope / Hagyong Kihm, Ho-Soon Yang // Optical engineering. - Vol.52 (9). - 2013. - P.1-9.

42. Kihm Hagyoung Optomechanical analysis of a 1-m light-weight mirror system / Hagyoung Kihm, Ho-Soon Yang, Yum-Woo Lee // Journal of the Korean Physical society. - Vol. 62, №9. - 2013. - P.1239-1246.
43. Manufacturing of lightweight mirror / X.Jingjiang, S. Shurmei, W. Qingwen, H. Xin. // Optics and precision engineering. – 2001. – Vol.9, №5. – С. 474–477.
44. Design, manufacturing and testing of a four-mirror telescope with a wide field of view / [P. Glosener, F. Wolfs, F. Lemagne та ін.]. – Rhodes, Greece: International conference on space optics, 2010.
45. Bin F. Design and test of a high performance off-axis TMA telescope [Электронный ресурс] / F. Bin, C. Wei-jun, H. Ying. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: http://www.congrexprojects.com/custom/ics0/2012/papers/FP_ICSO-038.pdf.
46. Оптимизация конструкции сверхоблегченных астрономических зеркал / [М. А. Абдулкадыров, Н. М. Владимиров, Н. С. Добриков та ін.]. // Научно-техн. журнал "Контенант". – 2015. – Т. 14, №1. – С. 8–12.
47. Fox Andrew ULE design considerations for f 3-m class light weighted mirror blank for E-ELT M5 / Andrew Fox, Tom Hobbs, Mary Edwards, Matthew Arnold, Kent Sawyer // Proc. of SPIE Vol. 9912 3F. – 2016. – P. 1–10.
48. Lee Haeng-Bor Trade study of all-SiC lightweight primary mirror and metering structure for spaceborne telescope / Haeng-Bok Lee, Jin-Young Suk, Jong-In Bae // Proc. of SPIE Vol. 9574 0D. – 2015. – P. 1–12
49. Chan Chia-Yen Mirror lightweight for a spaceborne remote sensing instrument / Chia-Yen Chan, Bo-Kai Huang, Ting-Ming Huang, Yi-Cheng Chen, Fong-Zhi Chen // Terr. Atmos. Ocean. Sci. - Vol.28, No.2. - 2017. - P.139-147. doi:10.3319/TAO.2016.03.29.02(EOF5).
50. C.Y.Chan Study of bonding position of isostatic mounts on a lightweight primary mirror / C. Y. Chan, Y. C. Chen, S. T. Chang, T. M. Huang, M. Y. Hsu // Proc. of SPIE Vol. 8516 0M. – 2012. – P. 1–7.

51. Wang C. Improved design of support for large aperture space lightweight mirror / C. Wang, P. Ruan, L. Qimin. // Proc. of SPIE. Vol. 89081P. – 2016. – С. 1–9.
52. Leys A. Cost-optimized methods extending the solution space of lightweight monolithic ZERODUR® mirrors to larger sizes / A. Leys, T. Hull, T. Westerhoff. // Proc. of SPIE. Vol.95730E-1. – 2016. – С.1-12.
53. Toney J. E. Multiphysics Modeling of Electro-Optic Devices [Электронный ресурс] / James E. Toney // Proceedings of COMSOL Conference, Boston. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: https://www.comsol.com/paper/download/83949/toney_paper.pdf.
54. Genberg V. Integrating MD Nastran with optical performance analysis [Электронный ресурс] / V. Genberg, G. Michels // MSC Software. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/MSC-UC-2011-Genberg.pdf>.
55. Michels G. Integrating ANSYS mechanical analysis with optical performance analysis using SigFit [Электронный ресурс] / G. Michels, V. Genberg, K. Doyle // ANSYS. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/CADFEM-2008-2.16.12.pdf>.
56. Michels G. Optomechanical analysis of diffractive optical elements [Электронный ресурс] / G. Michels, V. Genberg // SPIE. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/SPIE-9577-10.pdf>.
57. Michels G. Improvements in analysis techniques for segmented mirror arrays [Электронный ресурс] / G. Michels, V. Genberg, G. Bisson // SPIE. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/SPIE-9911-16.pdf>.
58. Michels G. Analysis techniques for adaptively controlled segmented mirror arrays [Электронный ресурс] / G. Michels, V. Genberg // SPIE. – 2012. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/SPIE-8447-50.pdf>.

59. Doyle K. Numerical methods to compute optical errors due to stress birefringence [Електронний ресурс] / K. Doyle, V. Genberg, G. Michels // SPIE. – 2002. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.sigmadyne.com/sigweb/downloads/SPIE-4769-05.pdf>.
60. Поздняков Д.В. Математичне моделювання статичного зображуючого фур'є-спектрометра для дистанційного зондування землі / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – №6. – С. 79-84. DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.78026.
61. Поздняков Д.В. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування», 10-11 грудня 2014 р. – Київ: КП СПБ «Арсенал». - 2014. – С.53-55.
62. Поздняков Д.В. Математичне моделювання зображувального фур'є – спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 22-23 квітня 2015р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – С.71-72.
63. Поздняков Д.В. Математическое моделирование изображающего фурье – спектрометра ДЗЗ / Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», 22-24 апреля 2015. – Минск: БНТУ. – 2015.
64. Куренков В. И. Методика выбора основных проектных характеристик и конструктивного облика космических аппаратов наблюдения: учебное пособие / В. И. Куренков, В. В. Салмин, А. Г. Прохоров. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.

65. Колобродов В. Г. Дифракційна теорія оптичних систем: підручник / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 140 с.
66. Артюхина Н. К. Математическое моделирование Фурье-видеоспектрометра / Н. К. Артюхина, Т. В. Климович, М. Н. Котов. // Приборы и методы измерений. – 2012. – №1. – С. 24–29.
67. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №2. – С. 89-96. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144.
68. Поздняков Д.В. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 35-36.
69. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / [В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова та ін.]. – Самара, 2010. – 271 с.
70. Сокольский М. Н. Допуски и качество оптического изображения / М. Н. Сокольский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 221 с.
71. Wyant J. C. Zernike Polynomials For The Web [Електронний ресурс] / James C. Wyant. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.mpia.de/AO/INSTRUMENTS/FPRAKT/ZernikePolynomialsForTheWeb.pdf>.
72. Лебедева Г. И. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы / Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль. // Оптический журнал. – 1994. – №8. – С. 57–62.
73. Pozdniakov D. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur //

- Eastern-Europe journal of enterprise technologies. – 2017. – №4, Information and controlling systems. – P.46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108458.
74. Li Zhilai Design and Analysis of 1.2m SiC Mirror and the Support / Zhilai Li // International Journal of material and mechanical engineering. - Vol.3, Issue 4. - 2014. - P.73-76.
 75. Параметри та характеристики матеріала Zerodur фірми Schott [Електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: http://www.schott.com/advanced_optics/german/download/schott_zerodur_katalog_july_2011_en.pdf.
 76. Поздняков Д.В. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів дистанційного зондування землі на деформацію їх оптичної поверхні / Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 16-ої Української конференції з космічних досліджень, 22-27 серпня 2016 р. – Одеса. – 2016 р. – С. 218.
 77. C.Y.Chan Design and analysis of isostatic mounts on a spaceborne lightweight primary mirror / C. Y. Chan, Y. C. Chen, S. T. Chang, T. M. Huang, M. Y. Hsu // Proc. of SPIE Vol. 8836 0K. – 2016. – P. 1–9.
 78. Kihm Hagyoung Bipod flexure for a 1-m primary mirror system / Hagyoung Kihm, Ho-Soon Yang, Yun-Woo Lee // Review of scientific instruments. - Vol.85. - 2014. - P.1-9.
 79. Поздняков Д.В. Метод кріплення та юстування великогабаритних позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / А.М. Ворох, І.Л. Зозуля, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференція «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 6-7 грудня 2016 р. – Київ. – 2016. – С.186-188.
 80. Поздняков Д.В. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Сборник тезисов докладов 6-

ой Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г. – Днепр. – 2017г. – С.80.

81. Freudling Maximilian New isostatic mounting concept for a space born Three Mirror Anastigmat (TMA) on the Meteosat Third Generation Infrared Sounder Instrument (MTG-IRS) / Maximilian Freudling, Jesko Klammer, Gregory Lousberg, Jean-Marc Schumacher, Christian Korner // Proc. of SPIE Vol. 9912 1F. – 2015. – P. 1–8.
82. Schipani Pietro The VST active primary mirror support system / Pietro Schipani, Massimo Capaccioli, Sergio D'Orsi, Luigi Ferragina, Laurent Marty // Proc. of SPIE Vol. 7739 31. – 2015. – P. 1–12.
83. David S. Ashby The Large Binocular Telescope primary mirror support control system description and current performance results / David S. Ashby, Jonathan Kern, John M. Hill, Warren D. Davison, Brian Cuerden // Proc. of SPIE Vol. 7018 4C. – 2015. – P. 1–12.
84. Поздняков Д.В. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 36-37.
85. Поздняков Д.В. Метод контролю форми асферичних дзеркал / Б.Ю. Пінчук, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 16-17 травня 2017р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С.32-33.
86. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №6. – С.93-100.

87. Поздняков Д.В. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 208.
88. Поздняков Д.В. Закономірності впливу розмірів великогабаритних дзеркал для дистанційного зондування Землі на вибір типу їх полегшення / Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №.1 – С.65-72.
89. Orthonormal polynomials in wavefront analysis: error analysis / Guang-ming Dai, Virendra N. Mahajan // 2008. - Режим доступу до ресурсу: <http://paristech.institutoptique.fr/site.php?id=562&fileid=6769>.
90. Tutorial review, Zernike polynomials: a guide / Vasudevan Lakshminarayanan, Andre Fleck // Journal of Modern Optics. - 2011. - P.546-561.
91. Пат. 94303 Україна, МПК G02B 17/00. Тридзеркальний анастигматичний квазіортоскопічних об'єктив / В.М..Тягур, М.І.Лихоліт, І.Є.Гринюк; заявник і власник Казенне підприємство спеціального приладобудування "Арсенал". - №200907107, заявлю 08.07.2009, опубл. 26.04.2011, Бюл.№8. - 6 с.
92. Тягур В. М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем зрения / В. М. Тягур, М. І. Лихоліт. // Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, №2. – С. 27–33.
93. Osawa Y., Hiramatsu M., Ichida K. PRISM: A panchromatic three-line-sensors for mapping boarded on ALOS // Proc. of SPIE. – 1998. – Vol. 3498 – P.173-180.
94. Barba J. The new instrument concept to follow up and improve the SPOT program success // Proc. of SPIE. – 1999. - Vol. 3870. – P.4-13.
95. Поздняков Д.В. Система разгрузки крупногабаритных зеркал для систем дистанционного зондирования Земли / А.М. Ворох, Д.В. Поздняков, И.Л.

Зозуля, И.Г. Игнатова // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 88.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Гіперспектральні сканери дистанційного зондування Землі

№	Назва	Платформа (назва супутника або літак), рік запуску	Тип	Висота орбіти, км	Просторове розділення, м	Ширина лінії захвату (розмір кадру), км	Кількість спектр. каналів	Спектр. діапазон, мкм	Ширина спектр. лінії, нм
1	AAHIS (Advanced Airborne Hyperspectral Imaging System)	літак 1994					288	0.43-0.83	
2	AHS (Airborne Hyperspectral Scanner)	літак					48	0.43-12.7	
3	AIP (Airborne Instrument Program)	літак						2.0-6.4	
4	AIS-1 (Airborne Imaging Spectrometer)	літак 1982-1985					128	0.9-2.4	
5	AIS-2 (Airborne Imaging Spectrometer)	літак 1986-1987					128	0.8-2.4	
6	AISA (Airborne Imaging Spectrometer for Application)	літак 1993	п-р-п				286	0.45-0.9	
7	ALI (Advanced Land Imager)	EO-1 1999			30	15	7	0.43-2.35	
8	AMS (Airborne Modis Simulator, based on Daedalus AADS-1268)	літак					50	0.53-15.5	
9	AMSS (Airborne Multispectral Scanner MK-II)	літак 1985					46	0.5-12.0	
10	APEX	літак 2008	призма				313-500	0.4-2.5	
11	ARES	літак 1986	решітка				75	2.0-6.5	
12	ARIES-1 (Australian Resource Information and Environment Satellite)	ARIES 2001			30	15	128	0.4-2.5	
13	ASAS (Advanced Solid-State Array)	1992			8	183	64	0.4-1.06	

	Spectroradiometer)								
14	ASTER Simulator	літак 1991					24	0.76-12.0	
15	AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)	літак 1987	решітка				224	0.38-2.5	10
16	CAESAR (CCD Airborne Experimental Scanner for Applications in Remote Sensing)	літак					12	0.52-0.78	
17	CAMODIS	літак 1993					91	0.4-12.5	
18	CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager)	літак 1989	решітка				288	0.4-1.0	2.9
19	CHRIS	АММ 2003	дисперсійний	677	30	19	256	0.4-1.05 1.05-2.5	10
20	CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer)	PROBA-1 2001	дисперсійний	829	17	13	62	0.4-1.05	
21	CHRISS (Compact High Resolution Imaging Spectrograph Sensor)	літак 1992					40	0.43-0.86	
22	CIS (Chinese Imaging Spectrometer)						91	0.4-12.5	
23	COI (Coastal Ocean Imager)			800	100	150		0.38-1.0 10.8-12	10 10
24	COIS (Coastal Ocean Imaging Spectrometer)	NEMO 2000	решітка	605	30-60	30	60 150	0.4-1.0 1.0-2.5	10
25	DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer)	1999	решітка	500	20-30	15	79	0.4-12.3	10
26	DAIS-16115	літак 1994					76 32 32 6 12	0.4-1.0 1.0-1.8 2.0-2.5 3.0-5.0 8.0-12.0	

							2	0.4-1.0	
27	DAIS-3715	літак 1994					32 1 2 1 1	0.36-1.0 1.0-2.0 2.17-2.35 3.0-5.0 8.0-12.0	
28	DAIS-7915	літак 1994	фур'є- спектро- метрКен- неді				32 8 32 1 6	0.4-1.01 1.5-1.788 1.97-2.45 3.0-5.0 8.7-12.7	
29	ENMAP	2011	призма				220	0.43-2.5	
30	EPS-A (Environmental Probe System)	літак					32	0.4-12.0	
31	FLI/PMI (Flourocence Line Imager/Programmable Multispectral Imager)	літак					228	0.43-0.805	
32	FTHSI (Fourier-Transform Hyperspectral Imager)	MightySat II.1 (Sindri P99-1) 2000	фур'є- спектро- метр Саньяка	570	30	6-26	256	0.47-1.05	1.7
33	FTIS (Fourier-Transform Imaging Spectrometer)	супутник	фур'є- спектро- метр	100	10	10.2	144	0.45-2.4	
34	GER-63	літак 1992					63	0.4-12.5	
35	GERIS (Geophysical and Environment Research Imaging Spectrometer)	літак 1986					63	0.4-2.5	25/120/16
36	GLI (Global Imager)	ADEOS II 1999			250- 1000	1600	36	0.38-11.95	
37	HIRIS	проект	решітка	500	30	24	192	0.4-1.0 1.0-2.45	9.4 11.7
38	HIS	літак 1996					128/256	0.4-2.5	
39	HRST	HRST			30	15	210	0.4-2.5	

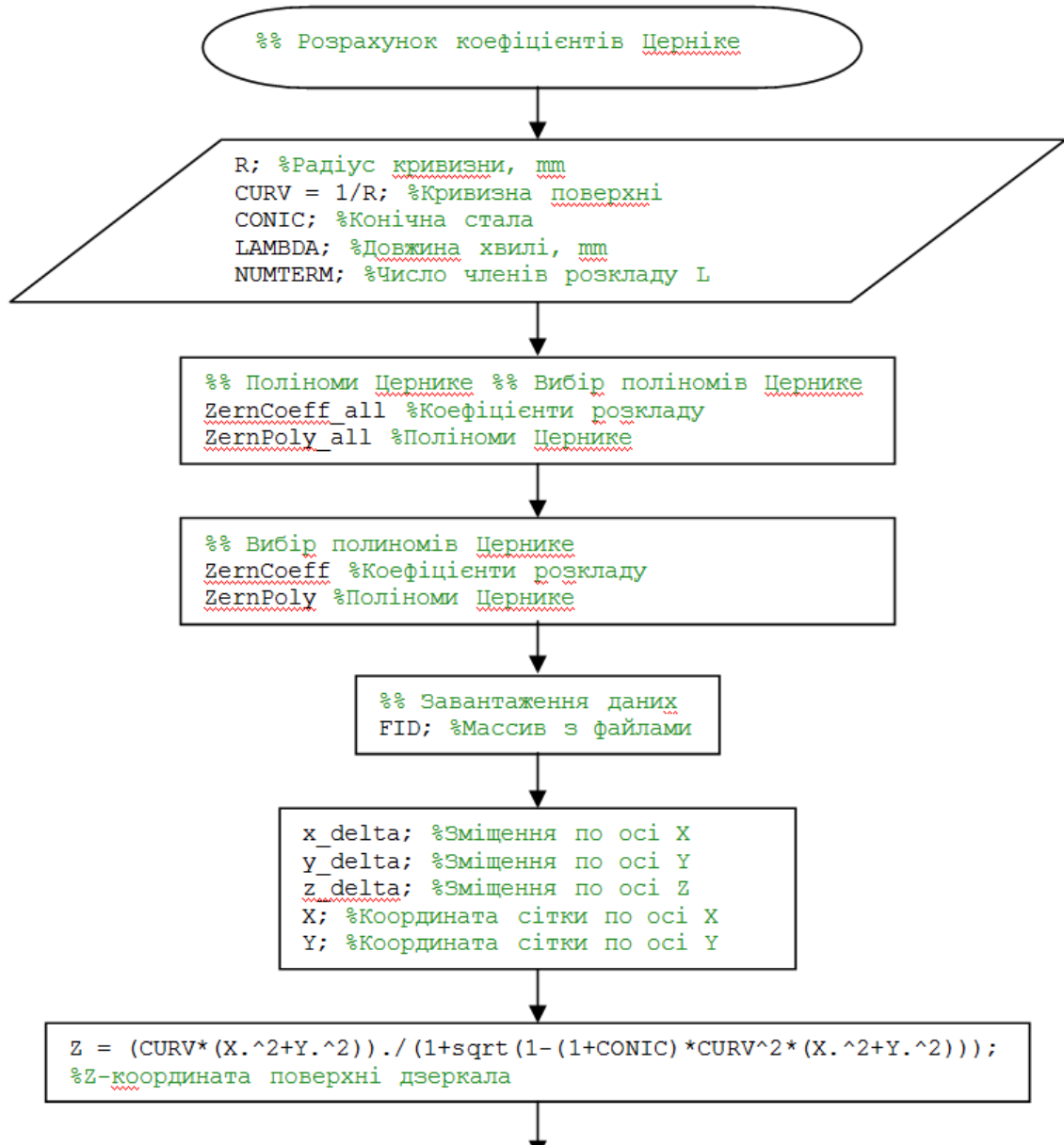
		2000							
40	HRST (Hyperspectral Remote Sensing Technology)				8	5	208	0.45-5.0	
41	HSI	Lewis 1997	диспер- сійний	517	30	7.7	384	0.4-1.0 0.9-2.5	5 6.5
42	Hybrid VIFIS	літак 1994					30 30	0.44-6.4 0.62-0.89	
43	HYC	Skymed Cosmo 2003	решітка	675	20-50; 300	20 300	60	0.4-2.5	10
44	HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)	літак 1994					206	0.4-2.5	
45	HyMap	літак 1997					126	0.45-2.48	15/15/17
46	Hyperion (Hyperspectral Sensor)	EO-1 2000	решітка	705	30	7.5x100	220	0.4-2.5	10
47	IISRB (Infrared Imaging Spectrometer)	літак					1720	3.5-5.0	
48	IMSS (Image Multispectral Sensing Scanner)						320	2.0-5.0	
49	IMSS (Image Multispectral Sensing)	літак					320	2.0-5.0	
50	IRIS (Infrared Imaging Spectroradiometer)	літак					256	2.0-15.0	
51	ISM (ImagingSpectroscopicMapp er)						128	0.8-3.2	
52	ISM (Imaging Spectroscopic Mapper)	літак 1991					128	0.8-3.2	
53	LATI	EOS-AM-2 2004	диспер- сійний	705	10;20	185	70	0.4-2.5	10
54	LIVTIRS 1 (Livermor Imaging Fourier Transform Imaging Spectrometer)	літак						3.0-5.0	
55	LIVTIRS 2 (Livermor Imaging Fourier Transform	літак						0.8-1.2	

	Imaging Spectrometer)								
56	MAIS (Modular Airborne Imaging Spectrometer)	літак 1991					71	0.44-11.8	20/600
57	MAS (MODIS Airborne Simulator)	літак 1992					50	0.54-14.52	
58	MAVIS	літак 1993					102	0.43-12.7	20/50/400
59	MEIS	літак 1992					200	0.35-0.9	
60	MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)	EnviSat 2002-2012		796	1040x 1200; 260x300	1150	15	0.4-1.05	
61	MIDIS (Multiband Identifier and Discrimination Spectroradiometer)	літак					256	0.4-30.0	
62	MIN-MAP								
63	MISI (RIT)	1996					60	0.4-1.0	
64	MIVIS	літак 1993					20 8 64 10	0.43-0.83 1.15-1.55 2.0-2.5 8.2-12.7	
65	MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer)`	EOS (Terra) 1999		685	250; 500; 1000	2330	36	0.4-14.2	
66	Moon Mapper	2008	решітка				261	0.45-3.0	10
67	MUSIC	літак 1989					90 90	2.5-7.0 6.0-14.5	
68	OMIS	літак 1999					128	1.4-12.5	10/60/1500
69	PHI	літак 1997					244	0.4-1.0	5
70	PRISM	EARTH EXPLORER 2000			50	50	202	10-1000	

71	ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer)	літак 1993	решітка				115	0.43-0.83	
72	SFSI	літак 1994					115	1.2-2.4	
73	SMIFTS	літак 1993	фур'є- спектро- метр Сан- ьяка				75 35	1.0-5.2 3.2-5.2	
74	SPIMs	1996	решітка				272	0.4-1.0	15
75	SSTI HSI (Small Satellite Technology Initiative Hyperspectral Imager)						384	0.4-2.5	
76	TRWIS-A TRWIS-B TRWIS-II TRWIS-III(TRW)	літак, 1990 1991 1992 1996					128 90 80 384	0.43-8.5 4.6-8.8 1.5-2.5 0.4-2.45	
77	VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)								
78	VIMS (Visible Infrared Mapping Spectrometer)						512	0.3-1.05	
79	Warfighter-1	Orbview-4 2001	решітка	470	8	5x20	40 80 80 80	0.45-0.905 0.83-1.74 1.58-2.49 3.0-5.0	11.4 11.4 11.4 25
80	WIS (Wedge Imaging Spectrometer)		фільтровий				170	0.4-2.5	
81	WIS-FDU WIS-VNIR WIS-SVIR (Hughes SBRC)	літак, 1992 1995 1995					64 129,265 81+90	0.4-1.03 0.4-1.0 1.0-2.5	
82	ГСА (Гиперспектральная аппаратура)	Ресурс-П		475-630	30	30	96	0.4-1.1	
83	ИКФС-2 (Инфракрасный фурье спектрометр)	Метеор-М	фур'є- спектро- метр	835		35		5-15	

ДОДАТОК Б

Алгоритм роботи математичної моделі визначення деформації



```

хexp = X + x_delta; %Координата зміщеної сітки по осі X
уexp = Y + y_delta; %Координата зміщеної сітки по осі Y
Zasph = (CURV*(хexp.^2+уexp.^2))./(1+sqrt(1-(1+CONIC)*CURV^2*(хexp.^2+уexp.^2)));
wexp = Z + z_delta - Zasph; %Деформації по осі Z

```

```

[phinorm,rnorm] = cart2pol(уexp,хexp); %Полярні координати сітки
rnorm = max(rnorm);
хexp_norm = хexp/rnorm; %Нормована координата по X
уexp_norm = уexp/rnorm; %Нормована координата по Y

```

```
%% Апроксимація по МНК
```

$$W(x, y) = \sum_{r=1}^{NUMTERM} A_r Z_r(x, y)$$

$$\sum [W(x, y) - wexp]^2 \rightarrow \min$$

```
%Вирішення СЛАР методом виключення Гаусса
```

```
%% Розрахунок значень wapprxmt для отримання рівняння хвильового фронту
```

$$W(x, y) = \sum_{r=1}^{NUMTERM} A_r Z_r(x, y)$$

```
%% Розрахунок PV
```

```
PV = (max(wapprxmt)-min(wapprxmt))/LAMBDA; %для розрахованих даних
```

```
%% Розрахунок RMS по загальній формулі
```

```
RMS = sqrt(mean(wapprxmt.^2)-(mean(wapprxmt))^2)/LAMBDA; %для розрахованих даних
```

```
%% Розрахунок RMS
```

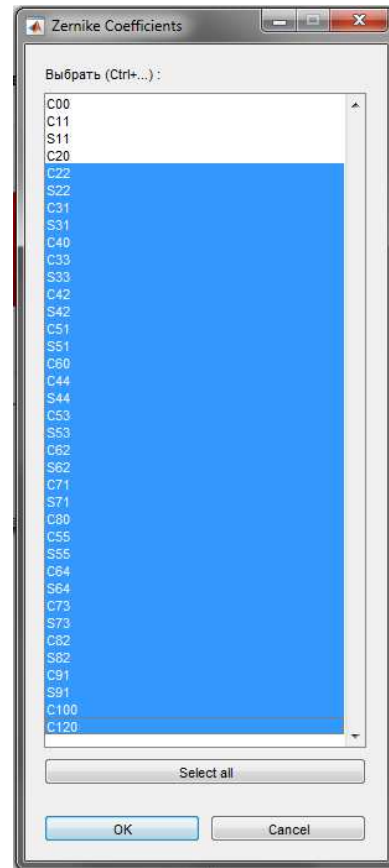
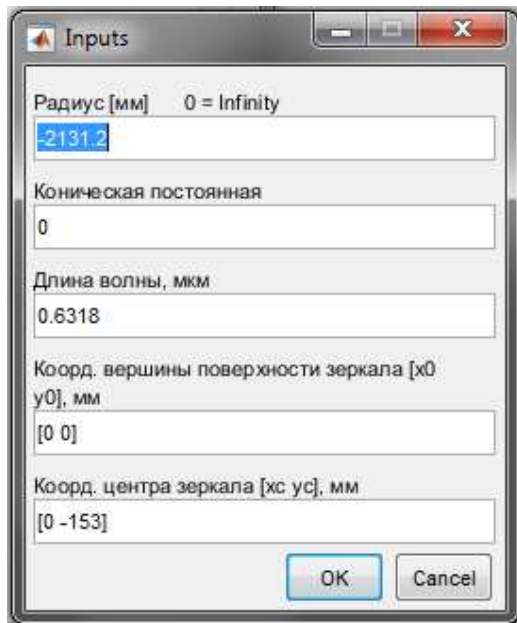
$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^{nmax} \left(\frac{a_n^2}{2n+1} + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{b_{n,m}^2 + c_{n,m}^2}{2n+1-m} \right)}$$

```
%%Збереження результатів
%% Кінець
```

ДОДАТОК В

Програма для визначення деформації, написана у програмному пакеті MatLab

Вихідними даними для роботи є: радіус кривизни поверхні, конічна стала, довжина хвилі, координати центра дзеркала по X та Y, координати вершини поверхні дзеркала (що знаходиться на оптичній осі).



Ввід вихідних даних для розрахунку

Вибір коефіцієнтів Церніке, що будуть виключені з розрахунку RMS

```
syms C00 C11 S11 C20 C22 S22 C31 S31 C40 C33 S33 ...
      C42 S42 C51 S51 C60 C44 S44 C53 S53 C62 S62 ...
      C71 S71 C80 C55 S55 C64 S64 C73 S73 C82 S82 ...
      C91 S91 C100 C120 x y wi
```

```
ZernCoeff_all = [C00; C11; S11; C20; C22; S22; C31; S31; C40; C33; S33; ...
                  C42; S42; C51; S51; C60; C44; S44; C53; S53; C62; S62; ...
                  C71; S71; C80; C55; S55; C64; S64; C73; S73; C82; S82; ...
                  C91; S91; C100; C120];
```

```
ZernPoly_all = [1;
                 x;
                 y;
                 (-1+2*(x^2+y^2));
                 (x^2-y^2);
```

```

(2*x*y);
(-2*x+3*x*(x^2+y^2));
(-2*y+3*y*(x^2+y^2));
(1-6*(x^2+y^2)+6*(x^2+y^2)^2);
(x^3-3*x*y^2);
(3*x^2*y-y^3);
(-3*x^2+3*y^2+4*x^2*(x^2+y^2)-4*y^2*(x^2+y^2));
(-6*x*y+8*x*y*(x^2+y^2));
(3*x-12*x*(x^2+y^2)+10*x*(x^2+y^2)^2);
(3*y-12*y*(x^2+y^2)+10*y*(x^2+y^2)^2);
(-1+12*(x^2+y^2)-30*(x^2+y^2)^2+20*(x^2+y^2)^3);
(x^4-6*x^2*y^2+y^4);
(4*x^3*y-4*x*y^3);
(-4*x^3+12*x*y^2+5*x^3*(x^2+y^2)-15*x*y^2*(x^2+y^2));
(-12*x^2*y+4*y^3+15*x^2*y*(x^2+y^2)-5*y^3*(x^2+y^2));
(6*x^2-6*y^2-20*x^2*(x^2+y^2)+20*y^2*(x^2+y^2)+15*x^2*(x^2+y^2)^2-
15*y^2*(x^2+y^2)^2);
(12*x*y-40*x*y*(x^2+y^2)+30*x*y*(x^2+y^2)^2);
(-4*x+30*x*(x^2+y^2)-60*x*(x^2+y^2)^2+35*x*(x^2+y^2)^3);
(-4*y+30*y*(x^2+y^2)-60*y*(x^2+y^2)^2+35*y*(x^2+y^2)^3);
(1-20*(x^2+y^2)+90*(x^2+y^2)^2-140*(x^2+y^2)^3+70*(x^2+y^2)^4);
(x^5-10*x^3*y^2+5*x*y^4);
(5*x^4*y-10*x^2*y^3+y^5);
(-5*x^4+30*x^2*y^2-5*y^4+6*x^4*(x^2+y^2)-36*x^2*y^2*(x^2+y^2)+6*y^4*(x^2+y^2));
(-20*x^3*y+20*x*y^3+24*x^3*y*(x^2+y^2)-24*x*y^3*(x^2+y^2));
(10*x^3-30*x*y^2-30*x^3*(x^2+y^2)+90*x*y^2*(x^2+y^2)+21*x^3*(x^2+y^2)^2-
63*x*y^2*(x^2+y^2)^2);
(30*x^2*y-10*y^3-90*x^2*y*(x^2+y^2)+30*y^3*(x^2+y^2)+63*x^2*y*(x^2+y^2)^2-
21*y^3*(x^2+y^2)^2);
(-10*x^2+10*y^2+60*x^2*(x^2+y^2)-60*y^2*(x^2+y^2)-
105*x^2*(x^2+y^2)^2+105*y^2*(x^2+y^2)^2+56*x^2*(x^2+y^2)^3-56*y^2*(x^2+y^2)^3);
(-20*x*y+120*x*y*(x^2+y^2)-210*x*y*(x^2+y^2)^2+112*x*y*(x^2+y^2)^3);
(5*x-60*x*(x^2+y^2)+210*x*(x^2+y^2)^2-280*x*(x^2+y^2)^3+126*x*(x^2+y^2)^4);
(5*y-60*y*(x^2+y^2)+210*y*(x^2+y^2)^2-280*y*(x^2+y^2)^3+126*y*(x^2+y^2)^4);
(-1+30*(x^2+y^2)-210*(x^2+y^2)^2+560*(x^2+y^2)^3-
630*(x^2+y^2)^4+252*(x^2+y^2)^5);
(1-42*(x^2+y^2)+420*(x^2+y^2)^2-1680*(x^2+y^2)^3+3150*(x^2+y^2)^4-
2772*(x^2+y^2)^5+924*(x^2+y^2)^6);

```

```
%% Загрузка данных
```

```
zemaxes = ['X';'Y';'Z'];
```

```
FID = cell(3,2);
```

```
for numFID = 1:3
```

```
    [FID{numFID,1},pathFID,filterIND] = uigetfile('*.csv','Открыть файл с данными по оси '
    zemaxes(numFID));
```

```
    if isequal(filterIND,0)
```

```
        disp('Canceled.');
```

```
        disp(' ');
```

```
        apol = 0;
```

```
        return;
```

```
    end
```

```
    cd(pathFID);
```



```

data = csvread(FID{numFID,1},1,0);
FID{numFID,2} = data(:,5);
disp([zemaxes(numFID) ' : ' FID{numFID,1} ' [' num2str(length( FID{numFID,2})) '
значений]']);
end

xyz_new = cell(1,3);
FID_new = cell(3,1);
for iaxispos = 1:3
    axispos = find(xyz_zemax(iaxispos,:)=0);
    xyz_new{1,axispos} = data(:,iaxispos+1).*xyz_zemax(iaxispos,axispos);
    FID_new{axispos,1} = FID{iaxispos,2}.*xyz_zemax(iaxispos,axispos);
end

x_delta = FID_new{1,1};
y_delta = FID_new{2,1};
z_delta = FID_new{3,1};

X = xyz_new{1,1};
Y = xyz_new{1,2};

if isequal(size(x_delta),size(y_delta),size(z_delta)) == 0
    disp('Массивы данных должны иметь одинаковую длину!');
    apol = 0;
    return;
elseif isequal(x_delta,y_delta,z_delta) == 1
    disp('Массивы данных НЕ должны совпадать!');
    apol = 0;
    return;
end
disp(pathFID);

%% Обработка данных
Z = (CURV*((X+x0).^2+(Y+y0).^2))./(1+sqrt(1-
(1+CONIC)*CURV^2*((X+x0).^2+(Y+y0).^2)));

hexp = X + x_delta;
yexp = Y + y_delta;
Zasph = (CURV*((hexp+x0).^2+(yexp+y0).^2))./(1+sqrt(1-
(1+CONIC)*CURV^2*((hexp+x0).^2+(yexp+y0).^2)));
wexp = Z + z_delta - Zasph;

hexp = hexp - xc;
yexp = yexp - yc;
[phinorm,rnorm] = cart2pol(yexp,hexp);
rnorm = max(rnorm);
hexp_norm = hexp/rnorm;
yexp_norm = yexp/rnorm;

%% Аппроксимация по МНК
for icoeff = 1:NUMTERM
    ZernPoly{icoeff} = ZernPoly_all(icoeff);

```

```

end

zpol = ones(length(wexp),NUMTERM);
for n = 1:NUMTERM
    zpol(:,n) = vpa(subs(sym(ZernPoly{n}},{x,y},{xexp_norm,yexp_norm})));
end

A = zeros(NUMTERM,NUMTERM);
B = zeros(NUMTERM,1);
for nc = 1:NUMTERM
    mnk = zpol(:,nc);
    for nr = 1:NUMTERM
        A(nc,nr) = sum(zpol(:,nr).*mnk);
    end
    B(nc,1) = sum(wexp.*mnk);
end

%Решение СЛАУ методом исключения Гаусса
determA = det(A);
if isequal(determA,0) == 0 %Матрица невырожденная
    [m,m] = size(A);
    xsys = zeros(m,1);
    C = zeros(1,m+1);
    aug = [A,B]; %Расширенная матрица
    for p = 1:m-1
        [aglav,ja] = max(abs(aug(p:m,p))); %Частный выбор главного элемента для столбца p
        C = aug(p,:);
        aug(p,:) = aug(ja+p-1,:);
        aug(ja+p-1,:) = C;
        if aug(p,p) == 0
            disp('Система уравнений имеет бесконечное число решений...');
            apol = 0;
            return;
        end
        for k = p+1:m %Прямой ход
            adiv = aug(k,p)/aug(p,p);
            aug(k,p:m+1) = aug(k,p:m+1)-adiv*aug(p,p:m+1);
        end
    end
    A_aug = aug(:,1:m);
    B_aug = aug(:,m+1);
    xsys(m) = B_aug(m,1)/A_aug(m,m);
    for ix = m-1:-1:1 %Обратный ход
        xsys(ix) = (B_aug(ix)-A_aug(ix,ix+1:m)*xsys(ix+1:m))/A_aug(ix,ix);
    end
else
    disp('Определитель равен 0. Матрица вырожденная...'); %Может иметь ни одного
    решения, единственное решение или бесконечное множество решений
    apol = 0;
    return;
end
apol = xsys;

```

```

%% Выбор коэффициентов Цернике
ALLTERM = 37;
for icoeff = 1:ALLTERM
    coeff{icoeff,1} = char(ZernCoeff_all(icoeff));
end
[sel,ok] = listdlg('ListString',coeff,'SelectionMode','multiple','ListSize',...
    [260 530],'Name','Zernike Coefficients','PromptString','Выбрать (Ctrl+...)
:','InitialValue',5:37);
if ok == 0
    disp('Canceled. ');
    disp(' ');
    PV_sok = 0;
    RMS_sok = 0;
    return;
end

NUMTERM = length(sel);
apol_k = zeros(ALLTERM,1);
for icoeff = 1:NUMTERM
    apol_k(sel(icoeff)) = 1;
end
apol_new = apol_k.*apol;

%% Расчет значений wapprxmt для полученного уравнения волнового фронта
for icoeff = 1:ALLTERM
    ZernPoly{icoeff} = ZernPoly_all(icoeff);
end
for icoeff = 1:ALLTERM
    poly(icoeff,1) = sym(ZernPoly{icoeff});
end

[phinorm,rnorm] = cart2pol(yexp,xexp);
rnorm = max(rnorm);
xexp_norm = xexp/rnorm;
yexp_norm = yexp/rnorm;

wfin = apol_new'*poly(1:ALLTERM,1);
wapprxmt = vpa(subs(wfin,{x,y},{xexp_norm,yexp_norm}));
wapprxmt = double(wapprxmt);

iexcl = setdiff(1:37,sel);
for iiexcl = 1:length(iexcl)
    ecoeff = char(ZernCoeff_all(iexcl(iiexcl)));
    excl{iiexcl} = ecoeff;
end

excl_text = strjoin(excl,', ');
disp(['Без ' excl_text ':']);
%% Расчет PV
PV_sok = (max(wapprxmt)-min(wapprxmt))/LAMBDA; %для рассчитанных данных
disp(['PV = ' num2str(PV_sok) ' waves']);

```

```

%% Расчет RMS при разложении на полиномы Цернике [ZernikePolynomialsForTheWeb]
NMAX = 6;
azern = zeros(NMAX,1);
bzer = zeros(NMAX,NMAX);
czern = zeros(NMAX,NMAX);
row = 1;
col = row+1;
count = 2;
while count < ALLTERM
    while col >= 2
        bzer(row,col-1) = apol_new(count);
        czern(row,col-1) = apol_new(count+1);
        col = col-1;
        count = count+2;
    end
    azern(row) = apol_new(count);
    row = row+1;
    col = row+1;
    count = count+1;
    if count == ALLTERM
        azern(row) = apol_new(count);
    end
end

RMS_sok = 0;
for n = 1:NMAX
    suma = 0;
    for m = 1:n
        suma = suma+0.5*(bzer(n,m)^2+czern(n,m)^2)/(2*n+1-m);
    end
    RMS_sok = RMS_sok+azern(n)^2/(2*n+1)+suma;
end
RMS_sok = sqrt(RMS_sok)/LAMBDA;

disp(['RMS по [Сокольский] = ' num2str(RMS_sok) ' waves']);

%% Отображение топограмм
figpos = get(gcf,'Position');
figure('Position',[figpos(1) figpos(2) figpos(3) figpos(4)]);
tri = delaunay(xexp,yexp);
subplot(1,2,1);
trisurf(tri,xexp,yexp,wexp);
title('Все полиномы');
view([0 90]);
xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
set(gca,'XDir','Reverse','ZDir','Reverse');
axis equal;
colormap(jet);
shading interp;
colorbar;
subplot(1,2,2);

```

```
trisurf(tri,xexp,yexp,wapprxmt);

title(['Bez ' excl_text]);
view([0 90]);
xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
set(gca,'XDir','Reverse','ZDir','Reverse');
axis equal;
colormap(jet);
shading interp;
colorbar;
end
```

ДОДАТОК Г

Значення коефіцієнтів Церніке

Далі у таблицях наведені значення коефіцієнтів Церніке для осесиметричних та позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал в залежності від їх габаритних розмірів та товщини.

Осесиметричні дзеркала, різні габаритні розміри

Діаметр дзеркала, мм	650						550					
	30	38	46	54	64	70	30	38	46	54	64	70
Товщина дзеркала, мм												
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5	5,45E-09	-5,34E-09	-2,06E-08	3,65E-08	-4,23E-08	-6,44E-08	-1,26E-07	-5,12E-09	-6,68E-08	4,97E-09	3,16E-08	-1,88E-08
6	-2,33E-08	-3,61E-07	-3,91E-08	-2,04E-07	-1,68E-07	-4,08E-07	-1,90E-07	-1,16E-07	-7,82E-08	-2,17E-07	-6,20E-07	-1,60E-07
7	-6,36E-06	-6,13E-06	-6,01E-06	-6,06E-06	-6,16E-06	-6,24E-06	-3,24E-06	-3,10E-06	-3,04E-06	-3,02E-06	-3,03E-06	-3,06E-06
8	-4,29E-09	-1,08E-10	-6,23E-09	-4,04E-09	-1,56E-08	-1,04E-08	-7,27E-09	-1,91E-09	-2,96E-09	4,02E-10	4,73E-09	-5,63E-10
9	4,90E-09	9,11E-09	5,40E-10	1,46E-08	-1,28E-08	2,62E-08	4,79E-09	1,40E-08	1,62E-08	1,41E-08	3,40E-09	1,68E-08
10	-9,73E-10	-3,91E-09	6,47E-09	8,22E-09	5,46E-10	1,41E-08	3,35E-09	5,10E-09	-2,36E-08	-9,73E-09	-5,08E-09	1,07E-08
11	3,21E-09	7,11E-09	1,36E-08	1,48E-08	1,50E-08	2,14E-08	9,96E-09	1,19E-08	1,37E-08	1,63E-08	1,72E-08	2,12E-08
12	-2,57E-06	-2,29E-06	-2,11E-06	-2,01E-06	-2,00E-06	-1,97E-06	-1,60E-06	-1,47E-06	-1,40E-06	-1,35E-06	-1,33E-06	-1,36E-06
13	1,93E-09	-6,58E-09	7,94E-09	2,42E-09	9,74E-09	5,73E-09	1,43E-08	2,07E-09	7,03E-09	-1,23E-09	-3,98E-09	2,44E-09
14	-4,44E-06	-3,61E-06	-3,07E-06	-2,65E-06	-2,42E-06	-2,21E-06	-2,76E-06	-2,19E-06	-1,84E-06	-1,61E-06	-1,47E-06	-1,41E-06
15	-1,56E-09	-1,22E-10	-3,20E-09	7,81E-09	-3,89E-09	-2,22E-08	-2,94E-08	-7,59E-09	-1,71E-09	8,08E-09	7,55E-09	-1,14E-08
16	4,32E-09	8,07E-09	2,14E-09	4,50E-10	5,11E-09	6,56E-09	-3,39E-09	-1,92E-09	-2,96E-09	-5,53E-10	-1,69E-09	-2,66E-09
17	2,09E-07	2,00E-08	-1,24E-07	-2,46E-07	-3,76E-07	-4,26E-07	1,21E-07	8,82E-09	-7,95E-08	-1,62E-07	-2,39E-07	-2,93E-07
18	9,46E-11	-2,41E-09	2,95E-10	-2,85E-09	-4,73E-09	-2,62E-09	2,21E-10	-4,12E-10	1,67E-09	7,71E-10	-3,30E-10	-7,90E-10
19	-7,83E-09	-9,21E-09	-9,11E-09	-8,39E-09	-2,47E-09	-1,09E-08	1,29E-09	9,21E-10	8,29E-12	1,29E-09	3,51E-09	1,52E-09
20	-7,89E-10	-6,70E-10	1,24E-09	6,62E-09	2,87E-10	-7,09E-09	-1,77E-08	-4,72E-09	-1,15E-08	2,29E-10	2,93E-09	-8,73E-11
21	1,66E-06	1,26E-06	9,97E-07	8,16E-07	7,29E-07	6,68E-07	9,87E-07	7,08E-07	5,47E-07	4,60E-07	4,34E-07	4,19E-07
22	2,17E-09	4,13E-09	3,82E-09	6,43E-09	6,82E-09	7,96E-09	-5,59E-10	1,52E-10	1,16E-09	1,18E-09	-2,32E-10	2,52E-09
23	-1,23E-09	-2,76E-09	-2,08E-09	5,62E-10	-3,25E-09	-3,94E-09	-4,82E-10	6,72E-10	2,69E-10	1,34E-09	4,81E-10	4,44E-10
24	7,18E-07	5,36E-07	3,78E-07	2,64E-07	1,36E-07	1,08E-07	3,89E-07	2,67E-07	1,78E-07	9,48E-08	2,00E-08	-2,07E-08
25	3,52E-09	-9,62E-10	5,52E-09	6,46E-09	1,02E-08	4,05E-09	7,08E-09	1,79E-09	3,27E-09	-1,10E-09	-9,54E-10	1,95E-09
26	3,47E-07	1,85E-07	7,19E-08	-4,38E-08	-1,53E-07	-2,01E-07	2,44E-07	1,12E-07	2,24E-08	-5,59E-08	-1,14E-07	-1,60E-07
27	-6,79E-10	3,29E-10	-3,30E-09	-1,30E-09	-1,87E-09	-6,11E-09	-7,96E-10	1,15E-09	9,79E-09	4,14E-09	1,74E-09	-5,64E-09
28	-1,34E-08	-1,02E-08	-1,18E-08	-6,32E-09	-6,75E-09	-1,36E-09	-8,63E-09	-4,46E-09	-3,50E-09	-4,95E-09	-7,32E-09	-3,10E-09
29	-1,99E-07	-1,81E-07	-1,91E-07	-2,06E-07	-2,33E-07	-2,32E-07	-1,19E-07	-1,23E-07	-1,32E-07	-1,49E-07	-1,69E-07	-1,79E-07
30	-6,16E-10	2,08E-10	2,19E-10	-1,86E-09	-8,46E-10	-3,82E-10	-7,42E-10	6,60E-11	-1,66E-10	-1,03E-09	2,05E-09	-4,82E-10
31	-6,42E-10	4,62E-10	-2,49E-09	-2,98E-09	-2,85E-09	-1,49E-09	-2,67E-09	-1,95E-09	-3,02E-09	-2,12E-09	-1,06E-09	-1,59E-09
32	-6,18E-10	7,78E-14	-3,12E-10	-7,74E-10	-6,22E-10	-5,30E-10	-1,34E-09	-1,58E-09	-2,65E-09	-1,47E-09	-2,61E-09	-2,64E-09
33	-2,09E-07	-9,75E-08	-2,32E-08	5,90E-08	1,36E-07	1,66E-07	-1,44E-07	-5,62E-08	8,52E-10	5,46E-08	9,07E-08	1,21E-07
34	2,68E-09	-2,20E-09	3,32E-09	2,85E-09	3,71E-09	1,00E-09	5,70E-09	7,96E-10	3,46E-09	-2,87E-10	-2,28E-09	-1,91E-10
35	4,93E-07	4,26E-07	3,80E-07	3,96E-07	4,22E-07	4,43E-07	2,67E-07	2,25E-07	2,36E-07	2,69E-07	3,18E-07	3,53E-07
36	-2,25E-09	1,42E-09	2,59E-09	3,30E-09	5,33E-09	-1,78E-09	-8,25E-09	-1,58E-09	2,13E-09	3,86E-09	2,46E-09	-4,96E-09
Деформація	0,01168	0,01056	0,009903	0,009619	0,009581	0,009562	0,006508	0,005727	0,005326	0,005098	0,005049	0,005007

Осесиметричні дзеркала, різні габаритні розміри

Діаметр дзеркала, мм	450						350					
	30	38	46	54	64	70	30	38	46	54	64	70
Товщина дзеркала, мм												
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5	-2,17E-09	1,21E-08	-1,51E-09	-8,16E-09	1,54E-09	-1,06E-08	-1,36E-08	7,64E-09	-8,79E-09	3,95E-09	2,94E-09	1,10E-09
6	1,15E-07	-1,12E-07	5,70E-08	-2,55E-08	-1,00E-07	-5,91E-08	9,18E-08	-4,00E-08	-5,69E-08	-4,80E-08	-1,29E-07	-1,21E-07
7	-1,54E-06	-1,49E-06	-1,47E-06	-1,43E-06	-1,42E-06	-1,44E-06	-5,31E-07	-5,68E-07	-6,00E-07	-6,23E-07	-6,49E-07	-6,70E-07
8	2,95E-09	1,84E-09	-1,73E-11	2,53E-09	2,76E-09	2,86E-10	1,24E-09	1,24E-09	-8,54E-10	4,72E-10	-2,41E-09	-2,47E-09
9	-6,63E-09	-3,10E-09	1,44E-08	1,76E-09	5,66E-09	3,50E-09	7,44E-10	3,74E-09	6,09E-09	5,78E-09	5,40E-09	5,41E-09
10	2,86E-09	9,39E-10	6,52E-10	4,36E-10	2,39E-09	2,67E-09	7,82E-11	9,60E-10	-2,28E-09	-1,61E-09	1,24E-10	8,78E-10
11	2,89E-10	2,25E-09	7,42E-09	6,77E-09	9,06E-09	1,05E-08	1,94E-09	2,98E-09	3,42E-09	4,29E-09	6,47E-09	6,41E-09
12	-9,03E-07	-8,51E-07	-8,43E-07	-8,35E-07	-8,43E-07	-8,89E-07	-4,68E-07	-4,61E-07	-4,70E-07	-4,91E-07	-5,26E-07	-5,62E-07
13	-1,75E-09	-7,76E-10	-6,44E-10	-2,07E-09	-2,50E-09	-2,17E-10	4,47E-10	-1,00E-09	-2,95E-10	-3,50E-10	1,08E-09	1,31E-09
14	-1,35E-06	-1,07E-06	-8,91E-07	-7,76E-07	-7,27E-07	-7,13E-07	-4,05E-07	-3,04E-07	-2,93E-07	-3,09E-07	-3,37E-07	-3,53E-07
15	-4,63E-09	1,53E-09	-1,86E-09	-2,89E-09	-9,49E-10	-5,51E-09	-5,92E-09	8,37E-10	-2,01E-09	1,51E-10	1,20E-09	-3,92E-10
16	-1,99E-09	-2,38E-09	-1,45E-09	3,84E-10	1,23E-09	-1,58E-09	-8,70E-10	-1,91E-10	6,96E-10	3,98E-10	1,30E-10	4,45E-10
17	4,38E-08	-2,21E-08	-7,98E-08	-1,36E-07	-1,97E-07	-2,36E-07	-8,54E-08	-1,03E-07	-1,17E-07	-1,41E-07	-1,69E-07	-1,91E-07
18	1,56E-10	2,13E-10	-1,04E-12	3,97E-10	8,21E-10	5,23E-10	1,20E-09	2,51E-10	4,06E-10	3,87E-10	2,36E-10	3,93E-10
19	-9,06E-10	-4,43E-10	-4,39E-09	-1,29E-09	-2,40E-09	-2,47E-09	-3,21E-10	-1,23E-09	-8,03E-10	-9,04E-10	-2,86E-09	-2,38E-09
20	-2,17E-09	1,98E-09	-6,12E-10	-1,80E-09	-3,57E-10	-3,24E-09	-3,79E-09	-8,21E-11	-2,60E-09	-1,00E-09	5,25E-10	6,94E-10
21	3,78E-07	2,39E-07	1,71E-07	1,36E-07	1,48E-07	1,58E-07	-2,66E-08	-6,43E-08	-4,26E-08	-4,33E-09	4,03E-08	6,41E-08
22	2,47E-09	1,80E-09	3,66E-09	3,85E-09	3,86E-09	5,10E-09	-3,49E-10	9,05E-10	1,62E-09	2,46E-09	3,10E-09	3,50E-09
23	3,64E-09	4,06E-09	3,63E-09	1,19E-09	1,52E-09	2,79E-09	-2,49E-10	-4,51E-10	-2,56E-10	-5,03E-10	-1,13E-09	-7,14E-10
24	1,58E-07	8,85E-08	3,88E-08	-1,22E-08	-5,89E-08	-8,76E-08	2,33E-08	-8,83E-09	-3,20E-08	-5,39E-08	-7,14E-08	-8,21E-08
25	-3,56E-10	1,17E-09	1,01E-09	-1,28E-09	-1,61E-09	5,26E-10	-5,55E-10	-2,31E-11	-5,10E-10	-1,28E-10	3,37E-10	6,83E-10
26	1,32E-07	3,13E-08	-3,67E-08	-8,23E-08	-1,18E-07	-1,62E-07	4,15E-08	-1,60E-08	-5,00E-08	-7,34E-08	-9,16E-08	-1,06E-07
27	-4,17E-10	-1,17E-10	2,17E-10	-5,17E-10	-5,81E-10	-8,58E-10	2,87E-10	-2,37E-10	1,12E-09	6,63E-10	1,21E-10	-3,87E-10
28	-4,30E-09	-2,50E-09	1,72E-09	-2,87E-09	-2,80E-09	-3,41E-09	5,90E-09	4,89E-09	3,87E-09	1,31E-09	-1,67E-09	-2,47E-09
29	-6,19E-08	-6,80E-08	-7,40E-08	-8,50E-08	-9,37E-08	-1,01E-07	2,11E-08	9,26E-09	-3,53E-09	-1,19E-08	-1,48E-08	-1,49E-08
30	-1,10E-09	-1,34E-09	-1,82E-09	3,19E-11	-6,01E-10	-8,34E-10	1,45E-09	1,34E-09	8,08E-10	1,73E-09	2,46E-09	1,94E-09
31	3,09E-10	8,93E-10	3,24E-10	7,56E-10	1,30E-09	9,14E-10	1,60E-09	1,62E-09	1,98E-09	1,56E-09	1,37E-09	1,53E-09
32	6,00E-10	3,09E-10	5,46E-10	2,15E-10	9,97E-11	1,03E-10	-3,03E-10	-5,52E-10	-9,79E-11	2,98E-10	-2,05E-10	3,90E-11
33	-7,27E-08	-5,82E-09	3,66E-08	6,65E-08	8,51E-08	1,18E-07	-6,55E-10	3,28E-08	5,12E-08	5,97E-08	6,61E-08	7,36E-08
34	2,68E-10	1,08E-09	7,91E-10	-1,48E-09	-5,14E-10	1,67E-10	5,70E-10	4,82E-10	2,66E-10	5,61E-10	5,43E-10	6,90E-10
35	5,60E-08	5,90E-08	8,85E-08	1,30E-07	1,79E-07	2,07E-07	-1,47E-07	-9,71E-08	-3,13E-08	3,51E-08	8,41E-08	1,06E-07
36	-1,50E-09	1,24E-09	1,26E-10	-1,24E-09	-2,87E-10	-1,95E-09	-2,06E-09	-9,13E-11	-7,47E-10	-9,73E-10	4,81E-10	8,74E-11
Деформація	0,00319	0,002792	0,002623	0,002497	0,002462	0,002511	0,001138	0,001086	0,001104	0,001147	0,001221	0,001281

Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал, різні габаритні розміри

Розмір дзеркала, мм		400x280						400x240					
Товщина дзеркала, мм		30	38	46	54	64	70	30	38	46	54	64	70
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5	7,08E-08	-8,52E-08	-8,30E-08	1,19E-07	-4,03E-09	2,63E-08	2,63E-08	-3,38E-08	-1,06E-07	1,71E-08	4,85E-08	-2,12E-08	-1,45E-09
6	-3,51E-06	-3,47E-06	-3,66E-06	-3,57E-06	-3,75E-06	-3,97E-06	-3,97E-06	-1,63E-06	-1,66E-06	-1,99E-06	-2,30E-06	-1,77E-06	-2,38E-06
7	2,68E-08	-1,18E-07	-5,63E-08	1,84E-08	-5,91E-08	2,63E-08	2,63E-08	-8,98E-08	5,01E-08	-8,37E-09	1,11E-08	-2,33E-07	-9,52E-08
8	-1,35E-06	-1,19E-06	-1,17E-06	-1,20E-06	-1,31E-06	-1,33E-06	-1,33E-06	-2,50E-06	-2,13E-06	-2,06E-06	-2,05E-06	-2,28E-06	-2,47E-06
9	5,59E-09	1,90E-07	1,01E-07	-6,20E-09	1,47E-07	2,11E-08	2,11E-08	1,22E-07	5,79E-08	4,95E-08	3,38E-09	3,00E-07	1,63E-07
10	5,54E-06	4,07E-06	3,67E-06	3,53E-06	3,87E-06	3,97E-06	3,97E-06	7,34E-06	5,32E-06	4,93E-06	4,84E-06	5,06E-06	5,55E-06
11	3,38E-07	8,41E-07	1,18E-06	1,53E-06	1,92E-06	2,14E-06	2,14E-06	4,48E-07	8,69E-07	1,29E-06	1,64E-06	2,22E-06	2,66E-06
12	-4,34E-06	-4,00E-06	-3,88E-06	-4,04E-06	-4,34E-06	-4,55E-06	-4,55E-06	-3,63E-06	-3,29E-06	-3,41E-06	-3,61E-06	-4,22E-06	-4,73E-06
13	-1,17E-08	-3,66E-08	-3,94E-08	-2,53E-08	-2,95E-08	-1,42E-08	-1,42E-08	-4,17E-08	-8,07E-09	-1,31E-08	-1,26E-08	-1,09E-08	-1,22E-08
14	1,82E-06	2,24E-06	2,32E-06	2,56E-06	2,80E-06	2,98E-06	2,98E-06	1,11E-07	9,01E-07	1,15E-06	1,31E-06	1,83E-06	2,26E-06
15	3,81E-08	1,22E-07	1,15E-07	8,91E-08	4,95E-08	4,85E-08	4,85E-08	7,41E-08	-3,49E-07	4,64E-08	3,63E-08	3,60E-08	2,86E-08
16	-2,16E-07	-3,15E-07	-3,62E-07	-4,11E-07	-4,62E-07	-4,70E-07	-4,70E-07	-2,65E-07	-3,95E-07	-4,28E-07	-4,86E-07	-6,25E-07	-7,22E-07
17	-4,80E-09	-8,57E-08	-5,41E-08	-1,20E-08	-3,58E-08	1,52E-08	1,52E-08	-6,01E-08	1,05E-08	-4,82E-09	-9,00E-10	-1,05E-07	-3,18E-08
18	3,07E-06	2,89E-06	2,78E-06	2,81E-06	2,94E-06	2,97E-06	2,97E-06	2,89E-06	2,67E-06	2,69E-06	2,73E-06	3,07E-06	3,35E-06
19	-2,23E-10	9,36E-08	5,92E-08	7,77E-09	4,77E-08	-7,61E-09	-7,61E-09	6,00E-08	-7,59E-09	1,62E-08	9,33E-10	1,20E-07	4,93E-08
20	-5,19E-06	-4,55E-06	-4,16E-06	-4,03E-06	-4,03E-06	-3,98E-06	-3,98E-06	-4,87E-06	-4,15E-06	-3,87E-06	-3,70E-06	-3,95E-06	-4,29E-06
21	-2,85E-08	-1,84E-07	-1,11E-07	-7,51E-08	-1,08E-07	-5,19E-08	-5,19E-08	-7,10E-08	9,45E-10	-7,98E-08	-2,83E-08	-1,81E-07	-1,03E-07
22	3,08E-07	3,19E-07	3,31E-07	3,89E-07	4,56E-07	5,03E-07	5,03E-07	3,28E-07	2,91E-07	3,25E-07	3,70E-07	4,77E-07	5,56E-07
23	-3,55E-09	-5,71E-09	-8,97E-09	-2,33E-09	-4,70E-09	-5,95E-09	-5,95E-09	-1,45E-08	-5,23E-09	1,75E-09	-2,40E-09	-2,27E-09	-4,94E-09
24	-4,66E-07	-5,89E-07	-6,88E-07	-8,23E-07	-9,69E-07	-1,07E-06	-1,07E-06	-4,01E-07	-4,36E-07	-5,57E-07	-6,64E-07	-8,49E-07	-9,98E-07
25	1,66E-08	2,34E-08	2,49E-08	2,21E-08	2,00E-08	1,69E-08	1,69E-08	3,28E-08	6,54E-09	7,54E-09	1,27E-08	8,54E-09	1,32E-08
26	-1,71E-07	-4,19E-08	5,35E-08	1,75E-07	2,91E-07	3,81E-07	3,81E-07	-2,47E-07	-1,83E-07	-8,57E-08	-4,90E-09	1,26E-07	2,50E-07
27	-1,84E-08	-1,32E-08	-3,10E-08	-1,41E-08	-8,94E-09	-6,48E-09	-6,48E-09	-4,71E-08	2,69E-08	1,08E-08	-1,80E-08	-1,53E-09	-7,36E-09
28	2,53E-06	1,93E-06	1,58E-06	1,25E-06	9,57E-07	7,70E-07	7,70E-07	2,81E-06	2,16E-06	1,91E-06	1,72E-06	1,50E-06	1,36E-06
29	-2,39E-09	-1,74E-08	-1,53E-08	-4,60E-09	-1,09E-08	3,86E-09	3,86E-09	-1,56E-08	-4,72E-10	1,08E-09	-1,28E-09	-2,14E-08	-5,51E-09
30	-4,34E-08	-3,68E-08	-2,54E-08	-2,12E-08	-1,01E-08	-6,70E-09	-6,70E-09	-8,82E-08	-6,30E-08	-5,77E-08	-5,74E-08	-7,17E-08	-8,20E-08
31	4,80E-09	2,19E-08	1,95E-08	3,50E-09	9,62E-09	5,71E-07	5,71E-07	1,89E-08	1,39E-08	-2,30E-09	1,84E-09	2,55E-08	1,00E-08
32	3,21E-07	3,73E-07	4,10E-07	4,64E-07	5,39E-07	5,71E-07	5,71E-07	2,87E-07	2,93E-07	3,40E-07	3,75E-07	4,65E-07	5,27E-07
33	-1,17E-08	-3,76E-08	-2,91E-08	-1,26E-08	-2,42E-08	-6,32E-09	-6,32E-09	-2,66E-08	-3,54E-09	-1,22E-08	-7,78E-09	-3,57E-08	-2,30E-08
34	-7,82E-07	-8,10E-07	-8,35E-07	-8,95E-07	-9,56E-07	-9,79E-07	-9,79E-07	-6,41E-07	-6,29E-07	-6,89E-07	-7,37E-07	-8,80E-07	-1,00E-06
35	1,65E-08	5,20E-08	4,07E-08	2,58E-08	3,19E-08	2,19E-08	2,19E-08	3,25E-08	-1,51E-08	1,10E-08	1,68E-08	4,58E-08	2,85E-08
36	-1,13E-09	9,55E-08	1,46E-07	2,73E-07	4,32E-07	5,13E-07	5,13E-07	-1,23E-07	-3,11E-08	-3,78E-08	-2,17E-08	1,28E-07	2,42E-07
Деформація		0,006643	0,005919	0,005539	0,005484	0,005611	0,005704	0,006675	0,005525	0,005336	0,005357	0,005905	0,006434

Позаосьові сегменти осесиметричних дзеркал, різні габаритні розміри

Розмір дзеркала, мм		400x200					
Товщина дзеркала, мм	30	38	46	54	64	70	
1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
4	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	
5	-1,43E-08	1,49E-08	-3,01E-08	-3,60E-08	1,12E-07	-1,46E-07	
6	1,90E-07	-7,59E-08	-3,55E-07	-8,70E-07	-1,39E-06	-1,25E-06	
7	3,11E-07	2,51E-07	1,90E-07	-8,35E-07	9,00E-07	4,04E-07	
8	-2,69E-06	-2,31E-06	-2,03E-06	-2,05E-06	-2,28E-06	-2,65E-06	
9	-2,74E-07	-2,13E-07	-1,01E-07	8,99E-07	-9,32E-07	-2,61E-07	
10	6,45E-06	4,89E-06	3,77E-06	3,69E-06	4,11E-06	4,77E-06	
11	8,47E-08	2,90E-07	7,68E-07	1,39E-06	2,12E-06	2,73E-06	
12	-2,02E-06	-1,56E-06	-1,82E-06	-2,49E-06	-3,36E-06	-4,22E-06	
13	-4,83E-08	-2,71E-09	-2,78E-08	-4,58E-08	3,51E-08	-1,03E-07	
14	-1,75E-06	-1,57E-06	-9,13E-07	-3,16E-07	4,40E-07	1,22E-06	
15	5,63E-08	-3,15E-08	2,06E-08	1,26E-07	-7,47E-08	1,98E-07	
16	-1,27E-07	-1,98E-07	-2,43E-07	-3,12E-07	-4,37E-07	-5,67E-07	
17	1,08E-07	1,02E-07	7,47E-08	-3,56E-07	3,77E-07	1,77E-07	
18	1,97E-06	1,83E-06	1,71E-06	1,85E-06	2,21E-06	2,67E-06	
19	-1,03E-07	-1,04E-07	-7,86E-08	3,91E-07	-3,93E-07	-1,11E-07	
20	-3,05E-06	-2,28E-06	-1,81E-06	-1,79E-06	-2,19E-06	-2,84E-06	
21	1,20E-07	1,19E-07	3,43E-08	-4,85E-07	4,39E-07	-1,46E-08	
22	2,09E-07	1,34E-07	1,81E-07	2,75E-07	3,86E-07	4,90E-07	
23	-1,70E-08	-2,16E-09	-5,36E-09	-6,61E-09	8,00E-09	-2,46E-08	
24	-1,85E-07	-1,79E-07	-2,61E-07	-4,36E-07	-6,28E-07	-8,11E-07	
25	2,68E-08	-3,05E-09	7,19E-09	2,12E-08	-1,88E-08	4,85E-08	
26	-5,58E-07	-5,98E-07	-4,94E-07	-3,48E-07	-1,97E-07	-5,09E-08	
27	-4,90E-08	9,79E-09	1,51E-08	-2,86E-08	2,02E-08	-5,59E-08	
28	2,35E-06	2,21E-06	1,95E-06	1,79E-06	1,61E-06	1,47E-06	
29	1,77E-08	1,91E-08	1,24E-08	-6,48E-08	7,06E-08	3,65E-08	
30	-5,71E-08	-3,63E-08	-2,07E-08	-2,22E-08	-2,24E-08	-3,60E-08	
31	-1,09E-08	-2,02E-08	-1,91E-08	7,29E-08	-7,23E-08	-2,19E-08	
32	1,91E-07	2,06E-07	1,90E-07	2,32E-07	2,95E-07	3,75E-07	
33	9,12E-09	2,28E-08	2,07E-08	-9,03E-08	8,15E-08	-6,92E-09	
34	-1,50E-07	-1,57E-07	-1,74E-07	-2,43E-07	-3,71E-07	-5,22E-07	
35	-1,14E-08	-2,91E-08	-1,36E-08	1,10E-07	-9,45E-08	3,03E-08	
36	-1,71E-07	-3,66E-07	-4,32E-07	-4,20E-07	-2,60E-07	-4,95E-08	
Деформація	0,005849	0,004601	0,003976	0,004293	0,005008	0,00574	

ДОДАТОК Д

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих Фур'є-спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Космічна наука і технологія. – 2014. – Т. 20, № 5 (90). – С. 35-40.
2. Поздняков Д.В. Математичне моделювання статичного зображуючого фур'є-спектрометра для дистанційного зондування землі / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2016. – №6. – С. 79-84. DOI: 10.20535/1810-0546.2016.6.78026.
3. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №2. – С. 89-96. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.94144.
4. Pozdniakov D. Development of software for combining finite element and optical analyses / V. Kolobrodov, D. Pozdniakov, V. Sokurenko, V. Tiagur // Eastern-Europe journal of enterprise technologies. – 2017. – №4, Information and controlling systems. – P.46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108458 (входить до наукометричної бази Scopus).
5. Поздняков Д.В. Вплив геометричних параметрів полегшення на деформацію робочої поверхні осесиметричних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2017. – №6. – С.93-100.
6. Поздняков Д.В. Закономірності впливу розмірів великогабаритних дзеркал для дистанційного зондування Землі на вибір типу їх полегшення / Д.В. Поздняков // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2018. – №.1 – С.65-72.

7. Поздняков Д.В. Оптичні системи зображуючих фур'є – спектрометрів дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 23-24 квітня 2014. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2014. – С. 64-65.
8. Pozdniakov D.V. Optical systems of fourier transform imaging spectrometer for remote sensing / D.V. Pozdniakov, V.G. Kolobrodov // Scientific works of 15th International young scientists conference «Optics and high technology material science», October 23-26, 2014. – Kyiv: Taras Shevchenko national university of Kyiv. – 2014. - P.173.
9. Поздняков Д.В. Математична модель функціонування статичного зображуючого фур'є-спектрометра дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей Української науково-технічної конференції «Авіакосмічне приладобудування», 10-11 грудня 2014 р. – Київ: КП СПБ «Арсенал». - 2014. – С.53-55.
10. Поздняков Д.В. Математичне моделювання зображувального фур'є – спектрометра статичного типу для дистанційного зондування Землі / В.Г. Колобродов, М.І. Лихоліт, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 22-23 квітня 2015р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2015. – С.71-72.
11. Поздняков Д.В. Математическое моделирование изображающего фурье – спектрометра ДЗЗ / Д.В. Поздняков // Сборник тезисов докладов 8-ой Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения», 22-24 апреля 2015. – Минск: БНТУ. – 2015.

12. Поздняков Д.В. Моделювання полегшення дзеркал оптичної системи космічного базування / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 35-36.
13. Поздняков Д.В. Аналіз впливу полегшення дзеркал для сканерів дистанційного зондування землі на деформацію їх оптичної поверхні / Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 16-ої Української конференції з космічних досліджень, 22-27 серпня 2016 р. – Одеса. – 2016 р. – С. 218.
14. Поздняков Д.В. Метод кріплення та юстування великогабаритних позаосьових сегментів осесиметричних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / А.М. Ворох, І.Л. Зозуля, Д.В. Поздняков // Збірник тез доповідей 2-ої Української науково-технічної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи», 6-7 грудня 2016 р. – Київ. – 2016. – С.186-188.
15. Поздняков Д.В. Облегчение крупногабаритных зеркал и методы их крепления / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Сборник тезисов докладов 6-ой Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», 23-26 мая 2017г. – Днепр. – 2017г. – С.80.
16. Поздняков Д.В. Контроль форми ввігнутих асферичних дзеркал / В.Г. Колобродов, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан і перспективи», 17-18 травня 2016. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2016. – С. 36-37.
17. Поздняков Д.В. Метод контролю форми асферичних дзеркал / Б.Ю. Пінчук, Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування: стан

- і перспективи», 16-17 травня 2017р. – Київ: НТУУ «КПІ». – 2017. – С.32-33.
18. Поздняков Д.В. Полегшення осесиметричних великогабаритних дзеркал для систем дистанційного зондування Землі / Д.В. Поздняков, В.М. Тягур // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 208.
19. Поздняков Д.В. Система разгрузки крупногабаритных зеркал для систем дистанционного зондирования Земли / А.М. Ворох, Д.В. Поздняков, И.Л. Зозуля, И.Г. Игнатова // Збірник тез доповідей 17-ої Української конференції з космічних досліджень, 21-25 серпня 2017 р. – Одеса. – 2017 р. – С. 88.

ДОДАТОК Е**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор-Головний конструктор

КП СПБ «Арсенал»

_____ Лихоліт М.І.

“ ____ ” _____ 2018 р.

Акт впровадження

Ми, що підписалися нижче, представники КП СПБ «Арсенал» заступник начальника науково-виробничого технологічного комплексу Тягур В.М., начальник відділу Оршак О.М., заступник начальника відділу Ворох А.М. склали цей акт про те, що розроблені в дисертаційній роботі інженера конструктора 2 кат. КП СПБ «Арсенал» Позднякова Дмитра Вікторовича «Зменшення деформації та ваги вхідної оптики зображуючого Фур'є – спектрометра космічного базування» алгоритм розрахунку деформацій робочих поверхонь дзеркал під впливом зовнішніх факторів та програмне забезпечення, створене на його основі, метод проведення дослідження впливу геометричних параметрів полегшення та кріплення дзеркал на деформацію їх робочих поверхонь, та результати проведених досліджень використані при проектуванні та створенні полегшених дзеркал сканерів високої роздільної здатності (СВРЗ) та надвисокої роздільної здатності (СНВРЗ).

_____ Поздняков Д.В.

_____ Тягур В.М.

_____ Оршак О.М.

_____ Ворох А.М.